

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN-TARAPOTO
FACULTAD DE ECOLOGÍA

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES



**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO SUMERGIDO Y UN FILTRO
PERCOLADOR EN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LAS AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS, MOYOBAMBA, 2014**

TESIS

**Para obtener el título de:
INGENIERO SANITARIO**

Autor:

Bach. ALBERTH ANTHONY RODRIGUEZ TUESTA

Asesor:

Ing. M.Sc. MIRTHA FELÍCITA VALVERDE VERA

MOYOBAMBA – PERÚ

2014

N° DE REGISTRO: 06055813



ACTA DE SUSTENTACION PARA OBTENER EL TITULO
PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO

En la sala de conferencia de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín-T sede Moyobamba y siendo las **Siete y Treinta de la noche** del día **Jueves 11 de Diciembre del Dos Mil Catorce**, se reunió el Jurado de Tesis integrado por:

Ing. MSc. YRWIN FRANCISCO AZABACHE LIZA
Ing. GERARDO CÁCERES BARDALEZ
Blgo. ALFREDO IBAN DÍAZ VISITACIÓN

PRESIDENTE
SECRETARIO
MIEMBRO

Ing. M.Sc. MIRTHA FELICITA VALVERDE VERA

ASESOR


Para evaluar la Sustentación de la Tesis Titulado “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO SUMERGIDO Y UN FILTRO PERCOLADOR EN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, MOYOBAMBA, 2014”; presentado por el Bachiller en Ingeniería Sanitaria **ALBERTH ANTHONY RODRÍGUEZ TUESTA**, según Resolución Consejo de Facultad N° 0189-2013-UNSM-T-FE-CF de fecha 30 de Diciembre del 2013.


Los señores miembros del Jurado, después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas formuladas y terminada la réplica; luego de debatir entre sí, reservada y libremente lo declaran: **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **BUENO** y nota **QUINCE (15)**.

En fe de la cual se firma la presente acta, siendo las **21:30pm** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el presente acto de sustentación.


Ing. MSc. Yrwin Francisco Azabache Liza
Presidente


Ing. Gerardo Cáceres Bardalez
Secretario


Blgo. MSc. Alfredo Iban Díaz Visitación
Miembro


Ing. M.Sc. Mirtha Felicita Valverde Vera
Asesor

DEDICATORIA

*A mis padres Elena y Benito,
que creen y me apoyan incondicionalmente
desde mi primer día en este mundo
y en cada paso que doy*

*A mis hermanos,
quienes están apoyándome
en todo momento*

Esto es para ustedes mi familia.

AGRADECIMIENTO

Dar las gracias de manera especial a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional para que hoy pueda alcanzar una de mis metas.

A la Ing. M.Sc. Mirtha Felícita Valverde Vera, mi asesora y excelente profesional, por sus orientaciones y todo el apoyo brindado durante la realización de esta investigación.

Al Dr. Ing Rudy Noriega Pissani, por su apoyo y direccionamiento en la etapa de diseño del prototipo, orientándome con su gran experiencia en este mundo del saneamiento.

Al Blgo. M.Sc. Alfredo Ibán Díaz Visitación, por su orientación y tiempo dedicado para permitir el enriquecimiento del presente trabajo de investigación.

A la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto, por apoyarme con el financiamiento de la presente investigación.

ÍNDICE

Pág.

PÁGINAS PRELIMINARES

Dedicatoria.....	i
Agradecimiento.....	ii
Índice.....	iii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... 01

1.1. Planteamiento del problema.....	01
1.2. Objetivos.....	02
1.3. Fundamentación teórica.....	03
1.3.1. Antecedentes de la investigación.....	03
1.3.2. Bases teóricas.....	06
1.3.3. Definición de términos.....	19
1.4. Variables.....	21
1.5. Hipótesis.....	21

CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO..... 22

2.1. Tipo de Investigación	22
2.2. Diseño de investigación.....	23
2.3. Población y muestra.....	24
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	24
2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	38

CAPÍTULO III: RESULTADOS..... 39

3.1. Resultados.....	39
3.2. Discusiones.....	64
3.3. Conclusiones.....	67
3.4. Recomendaciones.....	68

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... 69

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Diagrama general del sistema de filtración biológica.....	26
Figura 2.2: Sistema de filtración biológica ubicada en laboratorio.....	27
Figura 2.3: Efluente de tanque séptico.....	29
Figura 2.4: Operación del FS y FP en forma individual con inyección de aire.....	31
Figura 2.5: Operación del sistema en serie (FS+FP) con inyección de aire.....	32
Figura 2.6: Operación del sistema individual sin inyección de aire.....	33
Figura 2.7: Operación del sistema en serie sin inyección de aire.....	34
Figura 3.1: Eficiencia a diferentes alturas del filtro sumergido.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1.1: Composición típica del agua residual doméstica.....	08
Tabla N° 2.1: Tratamientos aplicados en el proceso de tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.	30
Tabla N° 2.2: Muestras tomadas en la experimentación.....	36
Tabla N° 2.3: Métodos empleados para la Parámetros físico, químicos y biológicos.....	37
Tabla N° 3.1: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 15 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual.....	39
Tabla N° 3.2: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 30 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual.....	40
Tabla N° 3.3: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 45 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual.....	40

Tabla N° 3.4: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 60 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual.....	41
Tabla N° 3.5: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 80 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en un sistema en serie.....	42
Tabla N° 3.6: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 20 días sin inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual.....	42
Tabla N° 3.7: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 40 días sin inyección de aire cuando las unidades funcionaron en un sistema en serie.....	43
Tabla N° 3.8: Eficiencia del FS para la remoción de SST con inyección de aire artificial.....	44
Tabla N° 3.9: Eficiencia del FS para la remoción de DBO con inyección de aire artificial.....	45
Tabla N° 3.10: Eficiencia del FS para la remoción de DQO con inyección de aire artificial.....	46
Tabla N° 3.11: Eficiencia de remoción del filtro sumergido a diferentes alturas del medio filtrante.....	47
Tabla N° 3.12: Eficiencia del filtro sumergido sin la inyección de aire artificial.....	49
Tabla N° 3.13: Eficiencia del FP para la remoción de SST con inyección de aire artificial.....	51
Tabla N° 3.14: Eficiencia del FP para la remoción de DBO con inyección de aire artificial.....	52
Tabla N° 3.15: Eficiencia del FP para la remoción de DQO con inyección de aire artificial.....	53
Tabla N° 3.16: Eficiencia del FP con y sin recirculación.....	54
Tabla N° 3.17: Eficiencia del filtro percolador sin la inyección de aire artificial.....	55
Tabla N° 3.18: Eficiencia del sistema biológico de tratamiento con inyección de aire artificial.....	57

Tabla N° 3.19: Eficiencia del sistema en serie sin la inyección de aire artificial.....	58
Tabla N° 3.20: Comparación de las eficiencias alcanzadas del FS, FP y cuando las unidades operaron como un sistema en serie con la inyección de aire.....	60
Tabla N° 3.21: Comparación de las eficiencias alcanzadas del FS, FP y cuando las unidades operaron como un sistema en serie sin la inyección de aire.....	61

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico N° 3.1: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de SST con inyección de aire artificial.....	44
Grafico N° 3.2: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de DBO con inyección de aire artificial.....	45
Grafico N° 3.3: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de DQO con inyección de aire artificial.....	46
Grafico N° 3.4: Eficiencia de remoción del filtro sumergido a diferentes alturas del medio filtrante.....	47
Grafico N° 3.5: Eficiencia del filtro sumergido sin la inyección de aire artificial.....	49
Grafico N° 3.6: Comparación de la eficiencia del filtro sumergido con inyección y sin la inyección de aire artificial.....	50
Grafico N° 3.7: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de SST con inyección de aire artificial.....	51
Grafico N° 3.8: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de DBO con inyección de aire artificial.....	52
Grafico N° 3.9: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de DQO con inyección de aire artificial.....	53
Grafico N° 3.10: Influencia de la recirculación en la eficiencia de remoción del filtro percolador.....	54

Grafico N° 3.11: Eficiencia del filtro percolador sin la inyección de aire artificial..... 55

Grafico N° 3.12: Comparación de la Eficiencia del filtro percolador con inyección y sin la inyección de aire artificial..... 56

Grafico N° 3.13: Eficiencia de remoción para el sistema de filtración biológico (FS+FP) con inyección de aire artificial..... 57

Grafico N° 3.14: Eficiencia de remoción para el sistema de filtración biológico (FS+FP) sin inyección de aire artificial..... 58

Grafico N° 3.15: Comparación de la eficiencia del sistema de filtración biológica con y sin la inyección de aire artificial.....59

Grafico N° 3.16: Comparación de la eficiencia de remoción del FS, FP individual y en serie con la inyección de aire artificial.....60

Grafico N° 3.17: Comparación de la eficiencia de remoción del FS, FP individual y en serie sin inyección de aire artificial..... 62

RESUMEN

La presente investigación planteó determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes del efluente de un tanque séptico empleando un sistema de filtración biológica, el sistema estuvo conformado por dos unidades de tratamiento secundario, un filtro sumergido y un filtro percolador, ambos con características idénticas de 1.53 m de altura y 0.20 m de diámetro. Se empleó como medio filtrante anillos de polipropileno de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 2.5 cm de longitud, colocadas en ambas unidades de tratamiento, formando una altura de 1.3 m en los filtros.

Para la operación del filtro sumergido, filtro percolador y sistema en serie, se realizó dos tratamientos, con y sin inyección de aire artificial generadas por dos bombas pequeñas de aire, una para cada unidad de tratamiento.

Se determinó que las mejores eficiencias de remoción del filtro sumergido fueron a los 80 días desde el inicio de funcionamiento cuando se inyectó aire artificial, se obtuvieron concentraciones de 16 mg/l de DBO, 51 mg/l de DQO y 36 mg/l de SST, significando eficiencias de 94%, 88% y 82% para la remoción de DBO, DQO y SST respectivamente.

La mejor eficiencias de remoción del filtro percolador fueron a los 60 días desde el inicio de funcionamiento cuando se inyectó aire artificial, se obtuvieron concentraciones de 58 mg/l DBO, 93 mg/l de DQO y 68 mg/l de SST, significando eficiencias de 77%, 77% y 63% para la remoción de DBO, DQO y SST respectivamente.

Para el sistema de tratamiento biológico en serie, formado por filtro sumergido más el filtro percolador con inyección de aire artificial se obtuvo eficiencias de 83%, 95% y 89% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que tanto el filtro percolador como el filtro sumergido resultan unidades de tratamiento importantes para las aguas residuales, cumpliendo ampliamente con los LMP para plantas de tratamiento de aguas residuales que establece la normativa peruana.

ABSTRACT

The present investigation raised determine efficiency in removing pollutants from the effluent of a septic tank using a biological filtration system, the system was composed of two units of secondary treatment, a submerged filter and a trickling filter, both with identical characteristics of 1.53 m in height and 0.20 m in diameter. It was used as packing material, polypropylene rings of $\frac{3}{4}$ -inch and 2.5 cm in length, placed in both treatment units, forming a height of 1.3 m in the filters.

For the operation of the submerged filter, and trickling filter system in series, two treatments was performed, with and without artificial injection of air generated by two small air pumps, one for each treatment unit.

It was determined that the best removal efficiencies were submerged filter to the 80 days since the start of operation when injected artificial air, concentrations of 16 mg/l of BOD, 51 mg/l of COD and 36 mg/l of TSS, meaning efficiencies of 94 %, 88% and 82% for the removal of BOD, COD and TSS respectively.

The best removal efficiencies of the trickling filter were at 60 days after the operation start when injected artificial air, concentrations of 58 mg/l BOD, 93 mg/l of COD and 68 mg/l of TSS, meaning efficiencies of 77 %, 77% and 63% for the removal of BOD, COD and TSS respectively.

For the system of biological treatment in series, formed by filter plunged more the submerged filter with injection of artificial air obtained efficiencies of 83 %, 95 % and 89 % for the parameters TSS, BOD and COD respectively.

The results indicate that both the trickling filter such as the submerged filter units are important for waste water treatment, fulfilling widely with the LMP for waste water treatment plants that establishes the Peruvian legislation.



CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En el Perú la cobertura de tratamiento de aguas residuales es baja, ya que hasta el 2010 tan solo el 32.7% de las aguas servidas eran tratadas, y eso hasta la actualidad no ha variado en forma significativa. Descargar las aguas residuales sin tratamiento previo ocasiona graves problemas de contaminación ambiental y riesgos a la salud, por ello las aguas residuales deben pasar por un proceso de tratamiento que ayude a disminuir los contaminantes y cumplir con las normas vigentes.

Implementar tecnologías para el tratamiento de aguas residuales es una necesidad para reducir la brecha de tratamiento. Se debe desarrollar tecnologías que den solución al problema a un menor costo, eficiencia y mayor facilidad en la operación y mantenimiento. Para garantizar la eficiencia del tratamiento que se desea alcanzar se debe conocer el comportamiento de una serie de parámetros, los cuales son muchas veces desconocidos en el interior del país, por no contar con investigaciones en tratamiento de aguas residuales.

En la selva peruana, y específicamente en la región San Martín los conocimientos que se tienen sobre la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales son reducidos. Es necesario investigar como funcionarían métodos de tratamiento alternos para ser aplicados en nuestra región y conocer parámetros de diseño como temperatura, DBO, DQO y otros que pueden influir en la eficiencia del tratamiento. Para ello el presente trabajo de investigación propuso la aplicación un filtro sumergido y un filtro percolador piloto en el tratamiento secundario de las aguas residuales y conocer la eficiencia del mismo.

Con estas consideraciones se planteó la siguiente interrogante: **¿Cuál es la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST de un filtro sumergido y de un filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas?**

1.2 Objetivos

➤ **Objetivo General:**

- Determinar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST de un filtro sumergido y de un filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas.

➤ **Objetivos Específicos:**

- Determinar la concentración de los parámetros fisicoquímicos (DBO, DQO, pH, SST, turbiedad y temperatura) del afluente y efluente de las unidades de tratamiento.
- Determinar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST del filtro sumergido.
- Determinar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST del filtro percolador.
- Determinar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST, de las unidades filtro sumergido y filtro percolador como un sistema de tratamiento biológico en serie.
- Comparar las eficiencias de remoción de DBO, DQO y SST, del filtro percolador, filtro sumergido y del sistema de tratamiento biológico en serie.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Antecedentes de la Investigación.

- Kamal, E., et al (2004). En su trabajo de investigación **“Effect of distribution nozzles on trickling filter performance, Egipto”**, construyeron dos filtros percoladores a escala piloto en campo para evaluar el efecto de una boquilla de chorro radial y la distancia de desplazamiento en el rendimiento del filtro percolador. Los resultados indicaron que el sistema de distribución tiene efectos importantes en el rendimiento de filtro percolador, y que la boquilla de chorro radial incrementó la proporción de eliminación de DBO y DQO en aproximadamente 10% más que la boquilla convencional para distribuidor fijo y en aproximadamente un 7% para el distribuidor giratorio, la boquilla de chorro radial también mejoró el porcentaje de oxígeno disuelto OD en el efluente del filtro para el distribuidor fijo pero no para el giratorio. La distancia de desplazamiento no tuvo aproximadamente efecto sobre el rendimiento del filtro percolador. El aumento de tasa de carga hidráulica redujo la eficiencia del filtro percolador, como también redujo el tiempo de retención hidráulica.
- Pereira, A. (2005). En su trabajo de tesis denominado **“Avaliação de desempenho de um filtro biológico percolador em diferentes meios suporte plásticos, Brasil”**, empleó un sistema de filtro percolador de área de superficie cuadrada de 1m², altura total de 3,5 m y 3,0 m de altura del medio de soporte con sedimentación secundaria. Los medios de soporte de plástico fueron anillos aleatorios y modular cross flow. En su resultado menciona que independientemente del medio de soporte plástico, de las cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas, se obtuvieron concentraciones de efluentes promedio de DQO, DBO y SST muy satisfactorias, respectivamente de 96 mg / l, 40 mg / l y 32 mg / l.
- Almeida, P. (2007). En su tesis de grado **“Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores uasb, com ênfase**

na nitrificação, Brasil", experimentó en un sistema compuesto por reactor UASB, filtro percolador (FBP) con 4 compartimientos de diferente reacción y 4 sedimentadores secundarios. Los cuatro compartimientos de la unidad de reacción (filtro percolador) lo llenaron con medio de soporte de características diferentes, siendo estos: escoria de alto horno n ° 4, viruta de conducto de 1 "de diámetro, anillos de plástico y el sistema " "Downflow Hanging Sponge" " DHS. En sus resultados menciona que todo el sistema UASB / FBP sin etapa de sedimentación secundaria presentó concentraciones de BDO total por debajo de 60 mg/L, para todos los medios de soporte, teniendo en cuenta cargas orgánicas volumétricas aplicadas de 0,43 y 0,24 kgDBO/m³. d. Para la tasa carga orgánica aplicada de 0,24 kg DBO/m³.d y tasa de aplicación superficial de 10 m³/m².d, las concentraciones totales de DBO estaban por debajo de 40 mg/L. El sistema UASB/FBP sin etapa de sedimentación secundaria presento valores de DQO total inferiores a 180 mg/L, cuando se utilizaron cargas orgánicas volumétricas de 0,43 y 0,24 kgDBO/m³.d y tasas de aplicación superficial 20 y 10 m³/m².d. Para una carga orgánica volumétrica de 0,24 kgDBO/m³.d y una tasa de aplicación superficial de 10 m³/m².d, las concentraciones de SST efluente estuvieron por debajo de 60 mg/L, para todos los medios de soporte.

- Rivera, A., et al (1998). En su trabajo de investigación **"Influencia de la recirculación en un sistema de filtro percolador, Cuba"**, Emplearon un sistema convencional de lecho percolador relleno con zeolita a escala piloto, con sedimentación primaria y secundaria, siendo el filtro percolador en forma de torre de sección cuadrada con una altura de empaque de 1.8 m y área de sección de 1.55 m², el área superficial específica del material de soporte fue de 45.8 m²/m³. Se basó en el estudio de la eficiencia de la remoción de DQO de residuales lácteos ante tres tipos de sistemas, tres razones y con recirculación, en sus conclusiones mencionan que la forma en la que llevaron a cabo la recirculación influyó sobre la eficiencia de remoción de la DQO del sistema, operando a tasa alta, siendo el mejor resultado de eficiencia de remoción en el sistema 87.4%, por ello el efecto

de dilución fue la función más relevante entre los objetivos que la recirculación ofreció para este proceso.

- Ramírez, A. (2010). En su trabajo de investigación **“Implementación del material denominado: Ripio clasificado de concreto como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto Ing. Arturo Pazos Sosa, Guatemala”**, implementó dos tanques metálicos de 75 centímetros de diámetro por 125 centímetros de alto, en sus resultados menciona que el DBO5 promedio para el ingreso de los filtros percoladores fue de 178.50 mg/litro; la DQO de 365.06 mg/litro y los sólidos sedimentables de 0.543 cm³/litro/hora. Para la unidad con medio filtrante piedra volcánica obtuvo una eficiencia de remoción promedio de la DBO5 de 89.38%; para la unidad con medio filtrante material PET, fue de 70.27%; y para la unidad con medio filtrante ripio clasificado de concreto fue de 85.18%. La eficiencia promedio de remoción de la DQO obtenida fue de 87.23% para la unidad con medio filtrante piedra volcánica, de 67.61% para la unidad con medio filtrante material PET y de 81.20% para la unidad con medio filtrante ripio clasificado de concreto.
- Reyes S., 2005. En su trabajo de investigación titulado: **“Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la eficiencia de remoción de un empaque estructurado en un filtro percolador, México”**, Concluye que, la eficiencia de remoción del filtro percolador está en función de la carga que se aplique, cuando la carga orgánica es mayor, la eficiencia de remoción disminuye, independientemente de la carga hidráulica. Para una mayor eficiencia de remoción del sistema es necesario encontrar el grosor de la biopelícula con la menor resistencia a la difusión, controlando la carga orgánica y el desgajamiento, es decir, fluctuaciones de la carga hidráulica.
- Garibay, J. & Orellana, B., 2011. En su trabajo de investigación titulado: **“Estudio de la Capacidad de los filtros biológicos aireados de un efluente RAFA para agua residuales provenientes de la industria del camal, Lima-Perú”** concluyen que la aplicación del sistema de filtros biológicos aireados de flujo vertical resulta ser eficaz, obteniéndose en

promedio valores de DQO promedio de 444 mg/L y DBO promedio de 255 mg/L.

- Bayona, J. & Quiroz, C., 2003. En su trabajo de tesis **“Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional de Trujillo mediante el uso de un biofiltro, Trujillo-Perú”** mencionan en sus conclusiones que, en práctica de laboratorio obtuvieron un porcentaje de eficiencia de remoción de DBO5 del 73.168 % a un tiempo de retención de 16 horas.

1.3.2 Bases Teóricas

1.3.2.1 Las aguas residuales domésticas

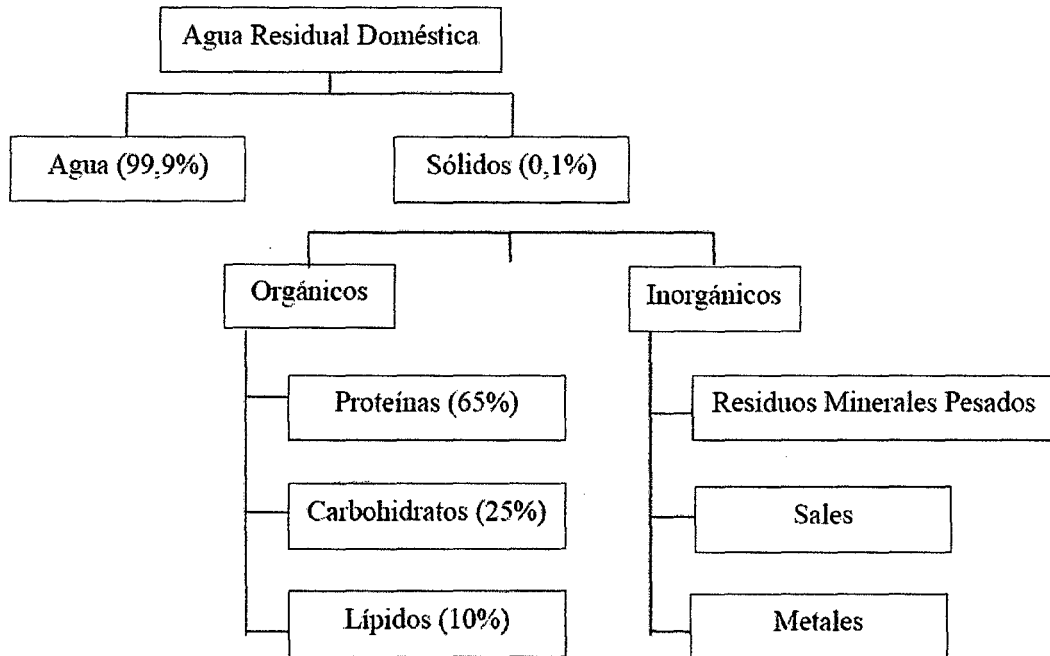
Llamamos aguas servidas o residuales domésticas a los líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición gran parte de agua, y que generalmente son vertidos a cursos de ríos, aguas continentales o marinas. (Seoanez, 1999).

Son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

A. Origen de las aguas residuales domesticas

Se consideran aguas residuales domésticas a los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales.

B. Composición de las aguas residuales domésticas



(Seoanez, 1999).

a. Composición química

- **Sólidos inorgánicos**, están formados principalmente por nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y algunas sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc.
- **Sólidos orgánicos**, se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados, es decir, los que contienen nitrógeno en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones.
- **Aniones y cationes** inorgánicos y compuestos orgánicos

b. Composición biológica

Las aguas residuales urbanas contienen gran número de organismos vivos que son los que mantienen la actividad biológica, produciendo fermentaciones, descomposiciones y degradación de la materia orgánica e inorgánica (Seoanez, 1999).

➤ Bacterias

Son organismos unicelulares móviles o inmóviles de formas diversas.

Podemos clasificar las bacterias de las aguas residuales urbanas según su nutrición en dos grandes grupos:

Según su nutrición

- Bacterias parasitarias
- Bacterias saprofitas

Según el medio

- Bacterias aerobias
- Bacterias anaerobias
- Bacterias facultativas

C. Composición típica del agua residual doméstica

Tabla 1.1 Composición típica del agua residual doméstica

Todas las unidades en mg/L menos los sólidos sedimentales.

CONSTITUYENTE	CONCENTRACION		
	FUERTE	MEDIA	DEBIL
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
Disueltos SD	850	500	250
SD fijos SDF	525	300	145
SD volátiles SDV	325	200	105
En suspensión SS	350	220	100
SS fijos SSF	75	55	20
SS volátiles SSV	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES ml/L	20	10	5
DBO5	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITROGENO (Total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
FOSFORO (Total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (como Co3Ca)	200	100	50
GRASA	150	100	50

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991 citado en Rolim, 2000.

1.3.2.2 Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales supone la aplicación de unos procesos básicos cuya utilización y secuencia vienen definidas por las características del agua a tratar y el grado de depuración que se deba conseguir. Los diferentes tratamientos existentes pueden dividirse en: primario, secundario o biológico, terciario y desinfección. (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1990)

A. Tratamiento preliminar

Este tratamiento consiste básicamente en una etapa preliminar como lo es la medición del caudal y posteriormente se precede a retirar materiales flotantes o pesados que comúnmente vienen en las aguas residuales y que disminuyen la eficiencia del tratamiento tales como plásticos, papeles, arenas y demás sólidos no orgánicos que solo causan daños al proceso. (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1990).

Estos son:

- Medición de caudal
- Desarenado
- Cribado

B. Tratamiento primario

Se considera unidad de tratamiento primario a todo sistema que permite remover material en suspensión, excepto material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua. Así, la remoción del tratamiento primario permite quitar entre el 60 a 70% de sólidos suspendidos totales y hasta un 30% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) orgánica sedimentable presente en el aguas residual. (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1990).

Las unidades que remueven los sólidos orgánicos son:

- Tanque imhoff
- Tanque de sedimentación

- Tanques de flotación
- Tanque séptico

C. Tratamiento secundario

Consiste en la biodegradación de la materia orgánica a través de la combinación de procesos anaerobios y aerobios para que se generen las bacterias responsables de realizar la descomposición y asimilación de los nutrientes provenientes del agua residual y consecuentemente la reducción de la contaminación (como DBO y DQO) (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1990).

Estos son:

- Lagunas de Estabilización
- Lodos activados (incluidos las zanjas de oxidación y otras variantes)
- Filtros Biológicos
- Módulos rotatorios de contacto

Principio de tratamiento biológico:

EL tratamiento biológico de aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante la actividad biológica. La actividad biológica se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual.

D. Tratamiento terciario

El tratamiento de nivel terciario tiene como objetivo lograr fundamentalmente la remoción de nutriente como nitrógeno y fósforo. Usualmente, la finalidad del tratamiento de nivel terciario es evitar que las descargas del agua residual, tratada previamente, ocasionen la eutrofización o crecimiento generalizado de algas en lagos, lagunas o cuerpos de agua de baja circulación (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1990).

Los procesos más usados son:

- Desinfección
- Lagunas
- Precipitación Química de Nutrientes Aireación Final
- Procesos de Filtración
- Destilación
- Flotación, osmosis inversa, entre otros

1.3.2.3 Filtro Percolador

El filtro percolador o biofiltro es un proceso muy usado para el tratamiento de aguas residuales. El filtro biológico no es un proceso diseñado para ejercer una verdadera acción de tamizado o filtración del agua residual sino para poner en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica.

Un filtro biológico tiene por objeto reducir la carga orgánica existente en aguas residuales domesticas o industriales. Consiste en un lecho de piedras, u otro medio natural o sintético, sobre el cual se aplican las aguas residuales (Romero, 2001).

La nomenclatura de este método de depuración es diversa, incluyendo términos como lechos o filtro bacterianos, filtros biológicos, lechos filtrantes o percoladores y filtros biológicos percoladores (Orozco et al, 2002)

A. Descripción del proceso

Los filtros percoladores son biorreactores que por medio de una capa de microorganismos adherida a un medio permeable permite la depuración de agua residual de manera aerobia. El medio permeable recibe el nombre de empaque y los microorganismos forman una capa en el empaque a la que se le denomina biopelícula o lama.

El empaque puede ser de roca o plástico. El diámetro de las rocas varía de 25 a 100mm y la profundidad del filtro puede ser entre 0.9 y 2.5 m, cuando el empaque es plástico se tienen profundidades de 9 a 12 m. Los filtros percoladores son generalmente circulares y cuentan con un distribuidor en la parte superior que mantiene toda la superficie mojada.

La materia orgánica del agua residual a depurar es el alimento de los microorganismos que se forman.

La materia orgánica que se encuentra en el agua residual es degradada por la población microbial que se encuentra adherida al empaque. Cuando el agua residual pasa a través del filtro, el oxígeno y nutrientes se difunden en la biopelícula, éstos son consumidos por la comunidad microbial, formándose algunos productos de desecho y CO₂ que se difunden de la biopelícula al agua.

Con este proceso los microorganismos crecen y aumenta el grosor de la biopelícula. La capa microbial tiene dos partes, una aerobia y la otra anaerobia, la parte aerobia es aquella que está en contacto con el agua residual, y es en ella donde se difunde la materia orgánica el oxígeno, es decir, donde se lleva a cabo el proceso de depuración. La parte de biopelícula que está en contacto con la pared del empaque es la parte anaerobia. Los microorganismos de esta parte entran a una fase endógena de crecimiento debido a que no cuentan con una fuente orgánica externa y pierden la habilidad de sostenerse en el empaque. Este fenómeno es llamado desgajamiento y es función de la carga orgánica e hidráulica. La carga hidráulica influye en la velocidad de corte y la orgánica en la tasa de microorganismos en la biopelícula (Tchobanoglous, et al., 2005).

➤ **Proceso microbiológico**

La comunidad biológica que se encuentra dentro de un filtro percolador pertenece principalmente al reino protista (encontramos bacterias aerobias, anaerobias y facultativas), hongos, algas y

protozoarios. También se encuentran otro tipo de animales como gusanos, larvas de insectos y lombrices.

Los microorganismos que predominan en los filtros percoladores son las bacterias facultativas. En general las bacterias son las encargadas de degradar la materia orgánica del agua residual. Las especies más comunes en los filtros percoladores son: *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* y *Alcaligenes*. Para la nitrificación las bacterias existentes son: *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.

Los hongos se encargan de la estabilización de los residuos bajo condiciones bajas de pH, sin embargo su crecimiento debe ser controlado, ya que podrían obstruir el paso del agua, las especies que se encuentran comúnmente en el filtro percolador son: *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Geotrichum*, *Sporotrichum*.

Las algas se encuentran en la parte donde da la luz del sol directa, y brindan más oxígeno al sistema durante las horas en que hay sol, las especies que se llegan a encontrar son: *Phormidium*, *Chlorella* y *Ulothrix*.

Los protozoarios controlan el crecimiento bacterial, predomina el grupo de los ciliados incluyendo: *Vorticella*, *Opercularia* y *Epistylis*.

Los gusanos, insectos y lombrices ayudan a mantener la población bacterial en alto crecimiento y rápida utilización de alimento. (Tchobanoglous, et al., 2005).

A lo largo de la profundidad del filtro ocurren cambios en la comunidad biológica, los cuales son función de la carga orgánica, de la carga hidráulica, de la composición del agua residual, del pH, de la temperatura, de la disponibilidad de oxígeno disuelto y de otros factores. La flora bacterial de la película superficial es similar a la de lodos activados: *Zooglea ramigera*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium* y *Alcaligenes*. Junto con *Achromobacter* constituyen, generalmente, el 90% de las bacterias presentes. (Romero, 2001).

➤ **Proceso de análisis**

Las principales variables que marcan el comportamiento de un filtro percolador son la carga orgánica, la hidráulica, la recirculación de agua tratada y la concentración del agua alimentada.

La recirculación del agua tratada en el filtro percolador aumenta la eficiencia del tratamiento, ya que también se regresan organismos viables, previene el estancamiento y reduce la molestia de malos olores y mosquitos.

La concentración del agua alimentada tiene que ver directamente con la cantidad de materia orgánica que se removerá, así como con la cantidad de microorganismos en el sistema (Reyes, 2005).

✓ **Carga orgánica**

La carga orgánica es el flujo másico de materia orgánica por unidad de volumen del filtro. Entre mayor sea la carga orgánica, mayor será la relación alimento: microorganismos, y más rápido crecerán las bacterias del sistema, y como consecuencia con altas cargas orgánicas, se tendrá una menor concentración de sustrato en el efluente, si la aireación, composición de sustrato u otro factor, no se convierten en limitantes (Grady, 2000 citado en Reyes, 2005).

La carga orgánica se expresa como la tasa a la que se suministra al sistema la demanda de oxígeno kg DQO/ m³d o kg DBO₅/m³d (Reyes, 2005).

✓ **Carga hidráulica**

La carga hidráulica es equivalente a la velocidad superficial que tiene el agua residual con la recirculación al pasar por el área plana del corte transversal del filtro. Sin embargo, ya que el flujo por el empaque es en láminas delgadas, la velocidad real es mayor; el incremento de la

carga hidráulica es proporcional a la velocidad real. La carga hidráulica afecta el tiempo de residencia del líquido que se filtra a través del empaque y simultáneamente la cantidad del líquido retenido en cualquier momento por el empaque. Es decir, el tiempo de retención disminuye con el aumento de la carga hidráulica.

Existen límites para la carga hidráulica, la mínima es de aproximadamente $1.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hr}$ ($0.74 \text{ gal}/(\text{min ft}^2)$), y si no es suficiente, será necesaria una recirculación. Como límite superior se debe prever que no haya desprendimiento excesivo de biomasa. Con esto se puede entender que es muy importante el control de la carga hidráulica en el filtro para su buen funcionamiento (Reyes, 2005).

B. Características constructivas y funcionales

➤ Distribución del agua

La distribución del agua residual debe ser lo más uniforme y continua posible. Por tanto hay que evitar atascos y paradas. Los aspersores pueden ser fijos o móviles. Los fijos requieren un dispositivo más complicado de distribución y, por tanto, una mayor pérdida de carga (alrededor de 2 m). Los móviles consisten en brazos giratorios dispuestos radialmente, con boquillas incorporadas y movidos por carga hidráulica. La pérdida necesaria es de 0,5 m. La velocidad es de 0,3 a 5 vueltas por minuto dependiendo de la carga superficial. (Muñoz H., Lehmann H., & Martínez G., 1995)

➤ Material de soporte

Es conveniente que la masa filtrante tenga la mayor superficie específica posible, para que se pueda formar la mayor cantidad de película biológica. Pero esta característica hay que conjugarla con el índice de huecos, ya que éstos serán los que permitirán el paso del aire y del agua.

Los materiales más utilizados son la piedra silícea, el pórfido o las puzolanas. Los materiales artificiales pueden ser desde escorias hasta elementos plásticos, fabricados especialmente para conjugar la

superficie y los huecos, de forma que se aumente el rendimiento por unidad de volumen. Se ha conseguido reducir el peso en un 95 %, duplicando el índice y aumentando la superficie específica. (Muñoz H., Lehmann H., & Martínez P.G., 1995)

➤ **Ventilación**

Ventilación natural

La ventilación natural se produce por la diferencia de temperaturas del aire y el agua. Al calentarse o enfriarse el aire en el interior del lecho se produce una variación de densidad que provoca el movimiento de la masa.

Cuando la diferencia no es mayor de 2°C, se para el tiro. Por tanto, el lecho estará aireado cuando se produzca una diferencia térmica, entre el agua y el aire, superior a 2°C.

Ventilación forzada

En algunos tipos, para evitar este paro de oxigenación, se recurre a la ventilación forzada, inyectando 0,3 m³/m²min, de forma artificial. Se recurre a este sistema cuando, por causas exteriores como frío, hay que cerrar los lechos (filtros percoladores). (Muñoz H., Lehmann H., & Martínez P.G., 1995)

➤ **Recogida del agua**

La recogida del agua residual tratada se efectúa por medio de un dispositivo de drenaje en el fondo del filtro percolador. Este sistema contará con un sistema de canales de recogida, con la característica fundamental de que no deben existir sedimentaciones, ya que el agua residual lleva los flóculos que sedimentarán en el decantador secundario. Para ello la pendiente será del 1% o 2, y la sección no ira nunca llena, ya que deberá servir también como canal de aireación. (Muñoz H., Lehmann H., & Martínez P.G., 1995).

1.3.2.4 Filtro Sumergido

Reactor de película fija sumergida empleado para la remoción de DBO y para nitrificación. Típicamente es un reactor comprimido en el cual los microorganismos se pueden adherir al medio filtrante, el agua es introducida en el fondo del reactor a través de un sistema apropiado, el aire y oxígeno es también introducido con el agua residual. (Tchobanoglous, et al., 2005).

Los filtros sumergidos pueden ser de flujo ascendente o descendente, aireados o anaerobios.

Filtro Sumergido aireado

En un filtro sumergido y aireado se considera que las burbujas de aire desgastan la biopelícula y previenen la tupición del medio soporte, además la turbulencia provocada por el aire suministrado al proceso garantiza no solo un buen contacto sustrato-microorganismo, sino también que este se distribuya uniformemente por todas las partes del filtro, por lo que el área superficial activa es igual al área superficial total del medio. (Gómez, D. 2000)

Es un tanque por el cual pasa un caudal de agua residual, la entrada del agua residual es por un extremo del tanque en la parte superior y la salida del agua tratada es en el extremo opuesto del tanque, también por la parte superior. El tanque es similar al utilizado en el proceso de lodos activados, con sistema de difusión de aire en el fondo del tanque. (Gómez, D. 2000)

Dentro del tanque se coloca el medio plástico, que está sumergido en agua residual. En este medio crecen microorganismos adheridos a la superficie del plástico, formando una película biológica, que se alimenta de la materia orgánica disuelta contenida en las aguas residuales, que alimentan al reactor.

El aire que se suministra por el fondo, abajo del medio plástico, asciende entre las separaciones del medio plástico y entra en contacto con los microorganismos que forman la película biológica. El aire proporciona el oxígeno requerido para la respiración endógena de los

microorganismos y para la oxidación de la materia orgánica que toman como alimento.

Además, las burbujas de aire difundido provocan un movimiento de convección forzada, que favorece el número de choques entre el sustrato (alimento), la película biológica (microorganismos) y el oxígeno contenido en el aire. En otras palabras, permite el mezclado y suministro de oxígeno, requerido para que la materia orgánica disuelta (DBO soluble) contenida en las aguas residuales se convierta en materia celular (microorganismos).

Los microorganismos producidos por la oxidación de la materia orgánica se van adhiriendo inicialmente a las paredes del medio plástico y posteriormente se forman varias capas biológicas sobrepuestas. (Gómez Salas, David 2000)

Esto ocasiona que los microorganismos de la última capa (la exterior) tengan mayor contacto con el sustrato o alimento y con el oxígeno del aire inyectado; en cambio, la capa adherida a la superficie plástica (la interior) cada vez tiene menos contacto con el sustrato y el oxígeno, por lo que se le dificulta la alimentación y respiración; hasta que muere y se desprende del plástico. El aire que asciende con turbulencia, ayuda a desprender la película biológica parcialmente muerta. (Gómez, D. 2000)

En la superficie plástica que queda libre al desprenderse la película envejecida, se inicia el crecimiento de una nueva película. Es un proceso dinámico repetitivo.

La biopelícula al desprenderse del medio plástico forma flóculos que se mantienen en suspensión debido a la turbulencia que produce el aire que se suministra al tanque y estos flóculos forman parte importante de los sólidos suspendidos volátiles contenidos en el reactor y en el efluente.

El efluente del proceso de película fija sumergida, es conducido al tanque de sedimentación, en donde se separan los flóculos para ser retirados por el fondo y el agua clarificada se obtiene por la parte superior. (Gómez, D. 2000)

1.3.3 Definición de Términos

➤ **Aceites y grasas**

Son compuestos de alcohol y glicerol, en las aguas residuales, las grasas y aceites provienen de la mantequilla y los aceites vegetales.

➤ **Afluente:**

Aguas residuales que ingresan al sistema de tratamiento.

➤ **Demanda bioquímica de oxígeno DBO**

Es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias.

➤ **Demanda química de oxígeno (DQO)**

Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

➤ **Desnitrificación**

Proceso metabólico que usa el nitrato como aceptor terminal de electrones en condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno) principalmente.

➤ **Efluente:**

Aguas residuales que salen del sistema de tratamiento.

➤ **Escala banco**

Se orienta a la configuración de las unidades experimentales con características geométricas y operacionales similares a los equipos de planta piloto o industriales.

➤ **Estándares de Calidad Ambiental (ECA):**

Son indicadores de la calidad ambiental, miden la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en

el aire, agua o suelo, pero que no representan riesgo significativo para la salud de las personas. La medición de un ECA se realiza directamente en los cuerpos receptores.

➤ **Límite Máximo Permisible (LMP):**

Concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. La medición de un LMP se realiza en los puntos de emisión y vertimiento.

➤ **Materia orgánica MO:**

Compuesto de carbono, hidrogeno, oxigeno, elementos comunes a todos los compuestos orgánicos, junto con el nitrógeno en algunos casos. También están presentes a menudo otros compuestos como es fosforo, azufre, hierro, etc.

➤ **Potencial Hidrógeno (pH)**

Medida de acidez o alcalinidad de una disolución, indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias.

➤ **Remoción**

Concentración de carga contaminante medido en DBO, DQO o SST, que es removida del agua residual.

➤ **Sólidos totales en suspensión (SST)**

Parámetro utilizado en la calificación de la calidad del agua y en el tratamiento de aguas residuales. Indica la cantidad de sólidos presentes en suspensión

➤ **Tiempo de retención hidráulico (TRH):**

Tiempo total que el agua demora en movilizarse por todo el sistema hasta su descarga en el cuerpo receptor.

1.4 Variables

1.4.1 Variable independiente

Aguas residuales domésticas (antes del tratamiento).

Indicadores de la variable:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- pH
- Sólidos Totales en Suspensión (SST)
- Temperatura (en el agua residual)
- Turbiedad

1.4.2 Variable dependiente

Eficiencia del filtro sumergido y filtro percolador.

Indicadores de la variable:

- Porcentaje de remoción de DBO, DQO y SST

1.4.3 Variable interviniente

Condiciones ambientales.

Indicadores de la variable:

- Temperatura (en el ambiente)

1.5 Hipótesis

El filtro sumergido y el filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas alcanzan eficiencias mayores de 70% para la remoción de DBO, DQO y SST.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo de Investigación.

- **De acuerdo a la Orientación.**
Aplicada.
- **De acuerdo a la Técnica de Contrastación.**
Explicativa

2.2 Diseño de Investigación.

Diseño pre experimental de Campbell y Stanley:

Se empleó este diseño teniendo como grupo experimental las aguas residuales del efluente de un tanque séptico, que ingresaron al filtro sumergido y filtro percolador, procediendo al análisis fisicoquímico antes del proceso de tratamiento para compararlo con los resultados del análisis después del tratamiento.

G O₁ X O₂

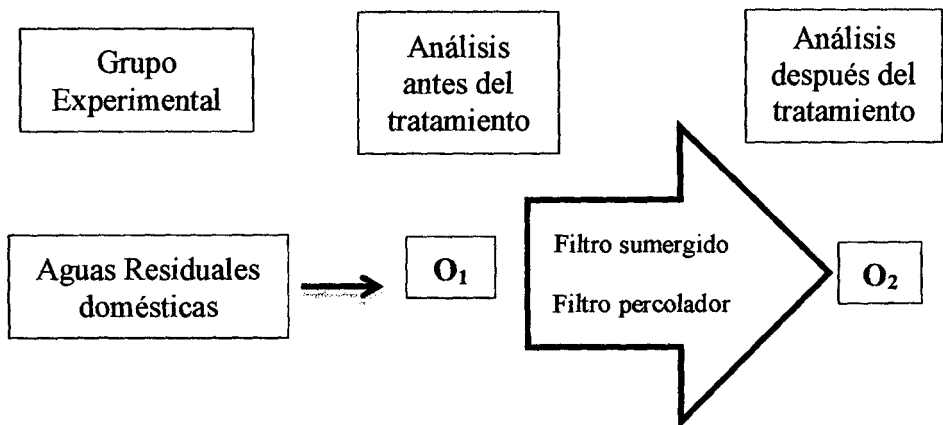
Nomenclatura:

G: Grupo experimental

O₁: Pre prueba

O₂: Post prueba

X: Tratamiento o Estímulo (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).



Comparación de los resultados de los análisis fisicoquímicos para determinar la eficiencia del filtro sumergido, filtro percolador:

O₁ vs O₂

2.3 Población y muestra.

➤ Población.

15.6 m³ de agua residual que es el volumen total utilizado en la investigación.

➤ Muestra.

Se tomaron 0.012 m³ de agua residual en un total 24 muestras de 500 ml cada una.

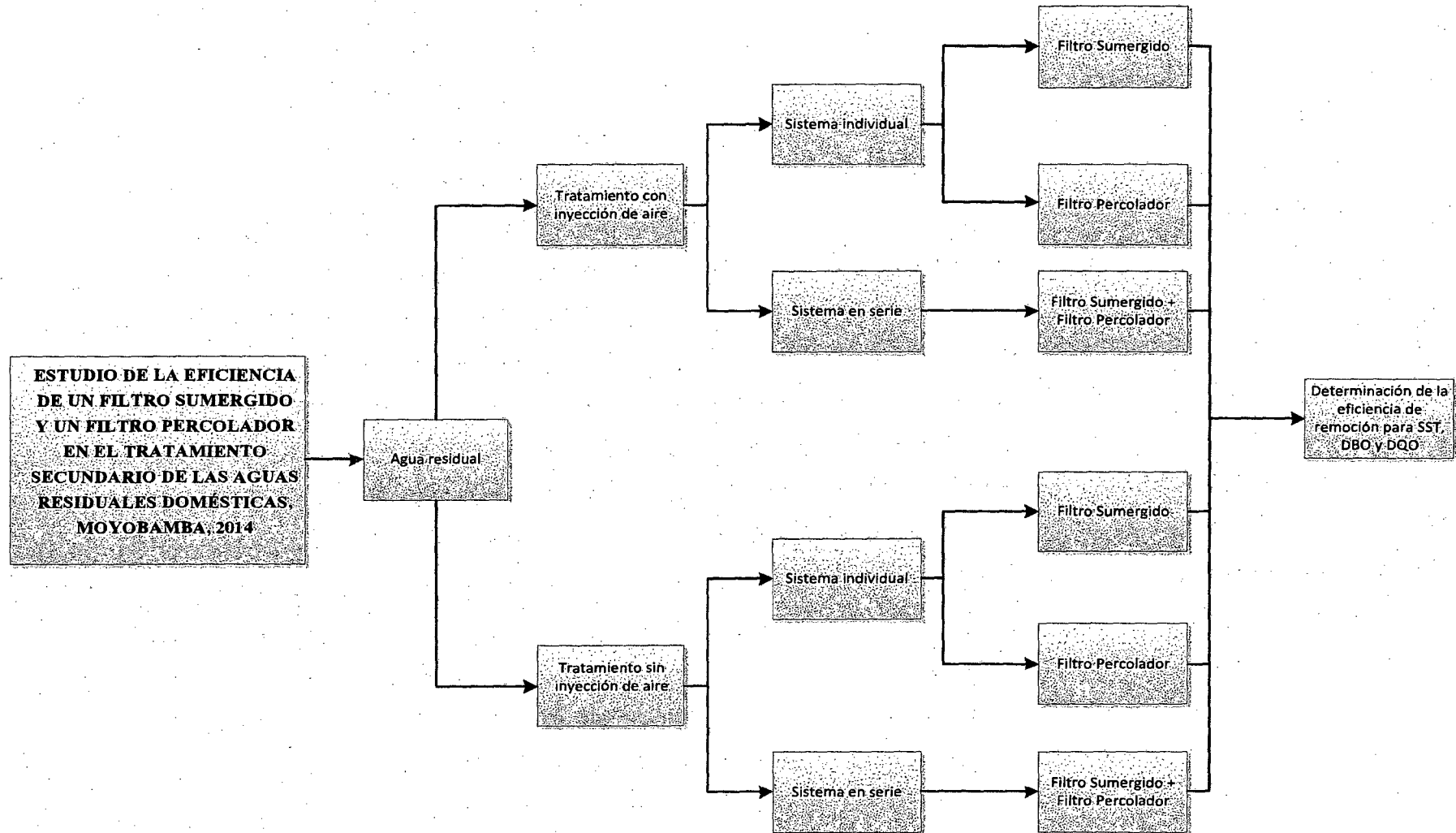
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La presente investigación fue desarrollada en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín-T, sede Moyobamba, para lo cual se construyó un sistema de filtración biológica a escala de laboratorio.

Básicamente el sistema contó con dos unidades de tratamiento secundario, un filtro sumergido de flujo ascendente y un filtro percolador, ambas unidades con características idénticas, constituidos de dos columnas de acrílico transparente acondicionados con un sistema de inyección de aire artificial y empleando como medio filtrante para ambas unidades manguera corrugada de polipropileno de $\frac{3}{4}$ de pulgada, cortados cada 2.5 cm.

El sistema se alimentó con el efluente de un tanque séptico, aplicando un caudal constante de 1.5 ml/s a cada unidad de tratamiento. El tiempo de experimentación fue de cuatro meses, se emplearon dos tratamientos, el primero tratamiento con la inyección de aire artificial, y el segundo tratamiento sin la inyección de aire artificial.

Diseño general de la metodología



Fuente: Elaboración propia, 2014

2.4.1 Sistema de filtración biológica (FP+FS)

Básicamente el sistema contó con dos unidades de tratamiento secundario, un filtro sumergido y un filtro percolador, ambas unidades con características idénticas, constituidos de dos columnas de acrílico transparente acondicionados con un sistema de inyección de aire artificial y empleando como medio filtrante para ambas unidades manguera corrugada de polipropileno de $\frac{3}{4}$ de pulgada, cortados cada 2.5 cm.

La Imagen 2.1 muestra el diagrama general del sistema de filtración biológica empleada en la investigación.

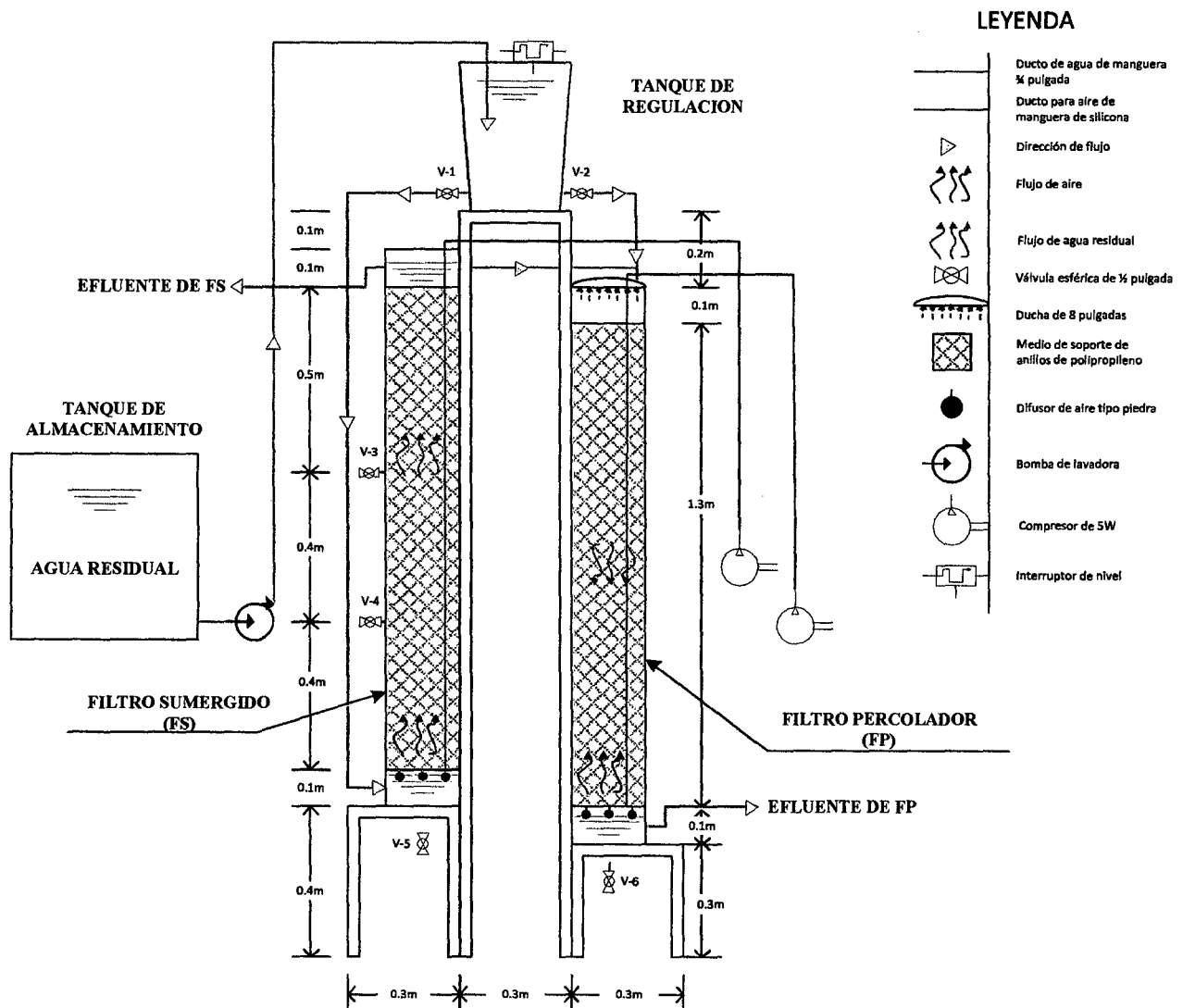


Figura 2.1: Diagrama general del sistema de filtración biológica

2.4.2 Montaje del sistema de filtración biológica

El sistema de filtración biológica empleado estuvo constituido por los siguientes componentes:

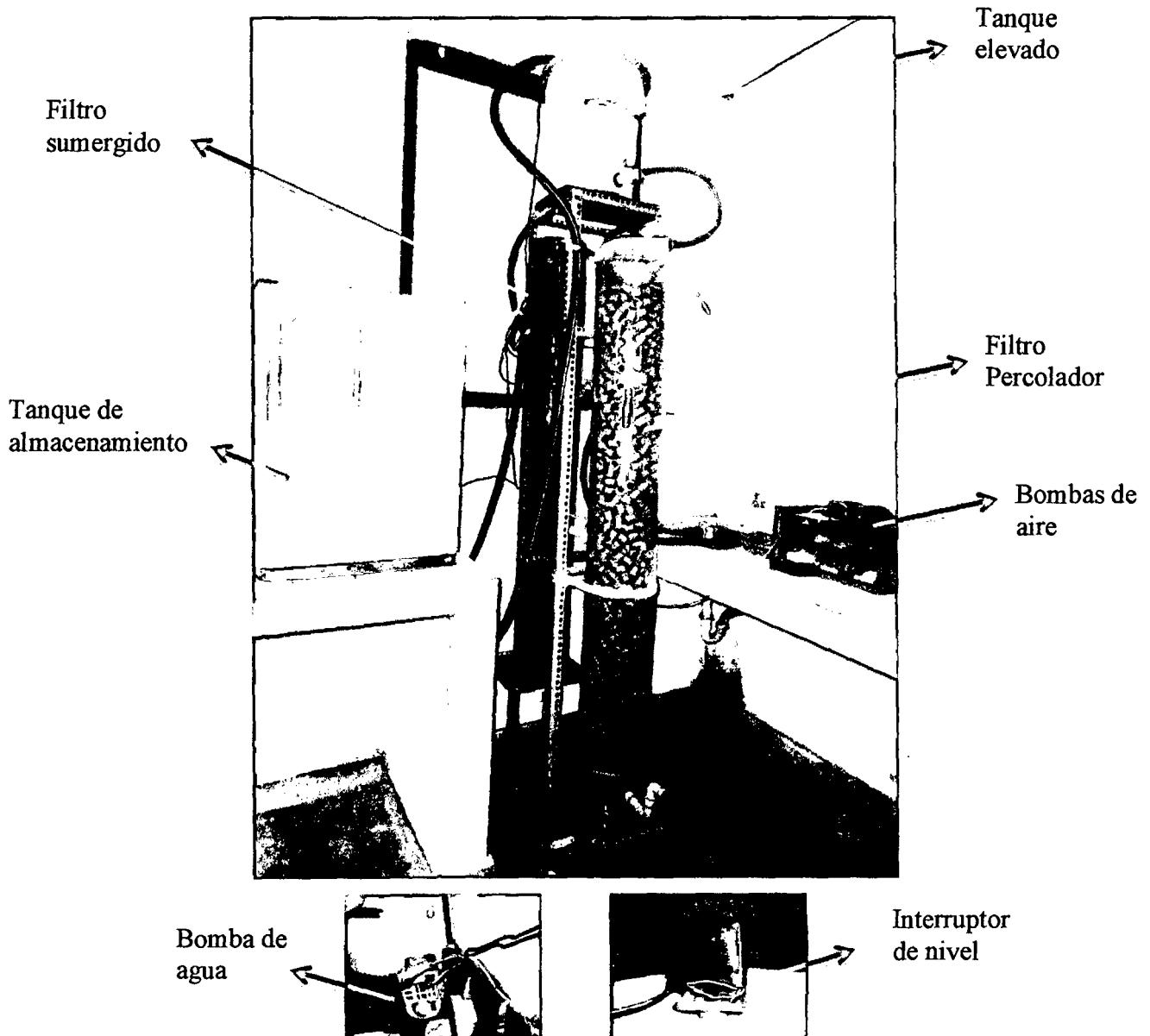


Figura 2.2: Sistema de filtración biológica ubicada en laboratorio

- **Tanque de almacenamiento**

Con capacidad de almacenar 80 litros, esta unidad se depositó agua residual proveniente del tanque séptico y en la parte baja sostiene a la bomba de agua.

- **Sistema de bombeo e interruptor de nivel**

La función de este componente fue la de bombear agua residual desde el tanque de almacenamiento al tanque elevado.

- **Tanque de regulación**

Tiene una capacidad de 16 litros y se encuentra a una altura de 2 m, su función es la de almacenar agua residual que será distribuida por dos llaves de regulación de caudal a cada filtro biológico.

- **Material de relleno o medio filtrante**

Tanto para el filtro percolador como para el filtro sumergido se empleó como medio filtrante manguera corrugada de polipropileno de $\frac{3}{4}$ ", empleando 100 m, los cuales fueron cortados cada 2.5 cm, obteniéndose anillos corrugados.

- **Filtro Sumergido**

Es una columna de tubo de acrílico transparente de 20 cm de diámetro y 1.50 m de altura, relleno 1.3 m con anillos corrugados de $\frac{3}{4}$ " y 2.5 cm de longitud. El filtro es de flujo ascendente, acondicionado con un sistema de aireación con difusores tipo piedra para la inyección del aire. La unidad se inunda con agua residual y tiene un tiempo de retención de 8.6 horas.

- **Filtro Percolador**

Es una columna de tubo de acrílico transparente de 20 cm de diámetro y 1.50 m de altura, relleno 1.3 m con anillos corrugados de $\frac{3}{4}$ " y 2.5 cm de longitud. El componente es de flujo descendente, el agua se distribuye por una ducha de 8" de diámetro, fue acondicionado con un sistema de aireación con difusores tipo piedra para la inyección del aire. La unidad no se inunda con agua residual y en la base (salida del agua tratada) hay un tiempo de retención de 0.6 horas.

- **Bombas de aire**

Se empleó dos bombas de aire de capacidad de producción de 8 l/min y 5W de potencia cada una.

- **Drenaje**

El filtro sumergido y filtro percolador cuentan con sistema de drenaje por separado que consiste en mangueras de $\frac{3}{4}$ " que dirigen el efluente de las unidades de tratamiento al drenaje del laboratorio.

2.4.3 Afluente de agua residual

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el agua residual que ha pasado por un tratamiento previo en un tanque séptico.

Los tanques sépticos se utilizan por lo común para el tratamiento de las aguas residuales de familias que habitan en localidades que no cuentan con servicios de alcantarillado o que la conexión al sistema de alcantarillado les resulta costosa por su lejanía. Se usa tanques sépticos en localidades rurales, urbanas y urbano-marginales.

El tanque séptico proporciona tratamiento primario, mediante la separación de sólidos presentes en el agua residual.

El tanque remueve sólidos al retener el agua residual y permitir la sedimentación de los sólidos en el fondo del tanque, mientras que los sólidos flotantes (aceites y grasas) suben a la superficie.

El efluente del tanque séptico es de poca variabilidad, es fácil de transportar y puede ser tratado fácilmente mediante procesos aerobios o anaerobios.



Figura 2.3: Efluente de tanque séptico

2.4.4 Tratamientos de la investigación.

La investigación tuvo como principal objetivo determinar la eficiencia de remoción de contaminantes de un sistema de filtración biológica, para lo cual se desarrolló un prototipo a nivel de laboratorio, compuesto básicamente por un filtro sumergido y un filtro percolador. Para la realización de la investigación se dividió en dos tratamientos: el primer tratamiento con la inyección de aire artificial, tanto al filtro percolador como al filtro sumergido, empleando para ello un sistema de inyección de aire, independiente para cada unidad. El segundo tratamiento se realizó con la aplicación del sistema de filtración sin la inyección de aire artificial.

Tabla N° 2.1: Tratamientos aplicados en el proceso de tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

Tratamiento	Descripción	Etapas	N° de días
T1	Operación del sistema con inyección de aire artificial	Individual (FP y FS)	60
		En serie (FS+FP)	20
T2	Operación del sistema sin inyección de aire artificial	Individual (FP y FS)	20
		En serie (FS+FP)	20

Fuente: Elaboración propia, 2014.

2.4.4.1 Tratamiento con inyección de aire.

En este primer tratamiento se inyectó aire al sistema biológico compuesto por un filtro sumergido (FS) y un filtro percolador (FP) por un periodo de 80 días desde el arranque del sistema, de esta manera proporcionar oxígeno disuelto a cada unidad de tratamiento, con la finalidad de que las condiciones de aire permitan el desarrollo de los microorganismos. Este tratamiento contó de dos etapas: cuando las unidades del sistema de filtración biológica operaron de manera individual y la segunda etapa cuando las unidades de tratamiento operaron como un sistema en serie.

➤ **FS y FP operando en forma individual con inyección de aire**

Las unidades de tratamiento del sistema de filtración biológica funcionaron de forma individual por 60 días desde el arranque del sistema, siempre con la inyección constante de aire. La operación fue según la Figura 2.4.

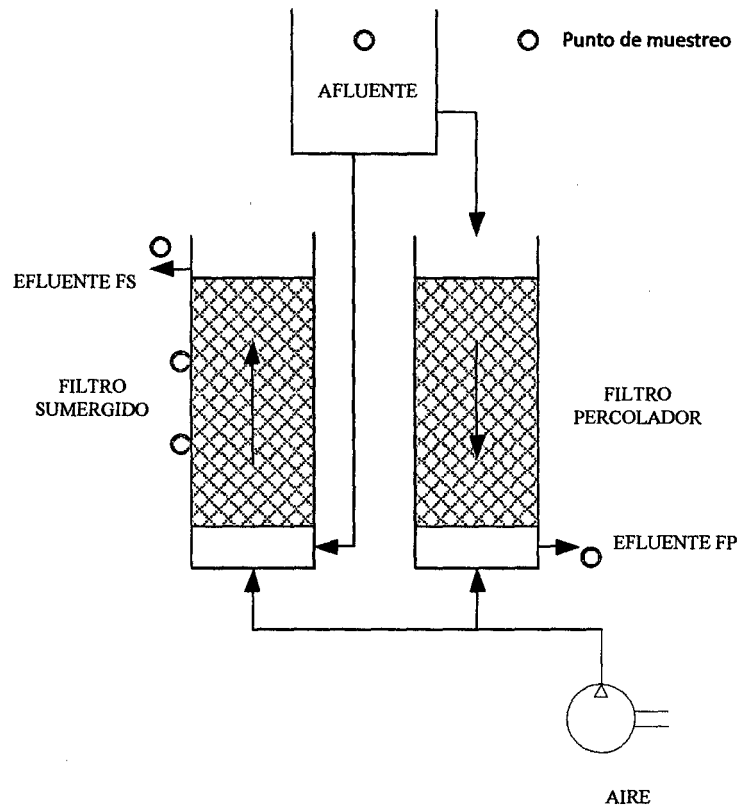


Figura 2.4: Operación del FS y FP en forma individual con inyección de aire

Filtro sumergido

La unidad operó en forma individual, se aplicó un caudal constante de 1.5ml/s de agua residual al sistema, el flujo fue de manera ascendente en la unidad.

Filtro percolador

La unidad operó de forma individual, se aplicó un caudal constante de 1.5 ml/s de agua residual. El flujo fue descendente, siguiendo un flujo pistón.

➤ **FS y FP operando como un sistema en serie con inyección de aire**

El sistema de tratamiento (FS+FP) operó en serie por un periodo de 20 días con inyección de aire, esto después de la etapa de funcionamiento de forma individual de las unidades que fue por 60 días, se aplicó un caudal constante de 1.5 ml/s.

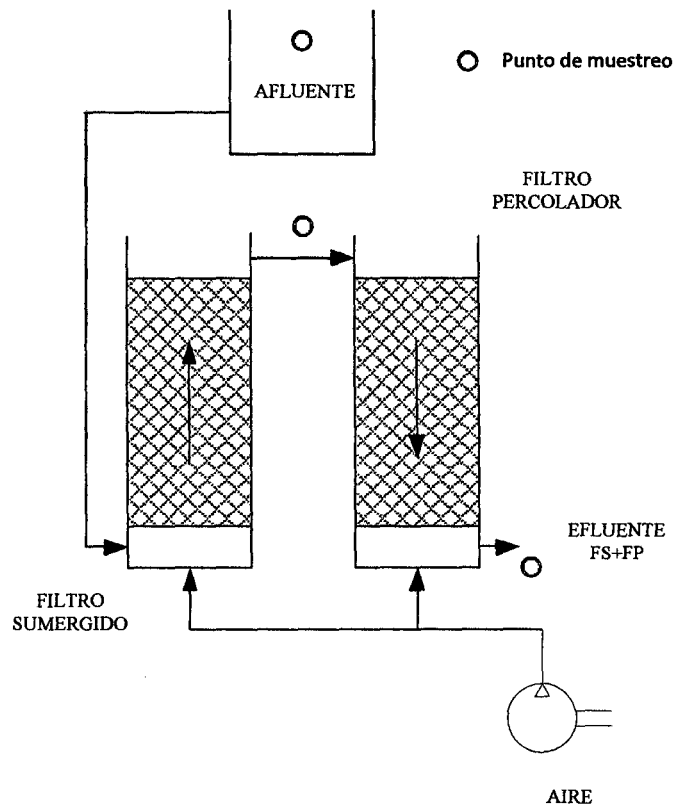


Figura 2.5: Operación del sistema en serie (FS+FP) con inyección de aire

2.4.4.2 Tratamiento sin inyección de aire artificial.

En este primer tratamiento no se inyectó aire al sistema biológico compuesto por un filtro sumergido y un filtro percolador, en esta condición el sistema operó por un periodo de 40 días. Al igual que en la primera tratamiento, éste tratamiento también contó de dos fases, cuando las unidades de del sistema de filtración biológica operaron de manera individual y la segunda etapa cuando las unidades de tratamiento operaron como un sistema en serie.

➤ **FS y FP operando en forma individual sin inyección de aire**

Las unidades de tratamiento funcionaron de forma individual por 20 días sin la inyección de aire artificial, esto después de la culminación del tratamiento con inyección de aire.

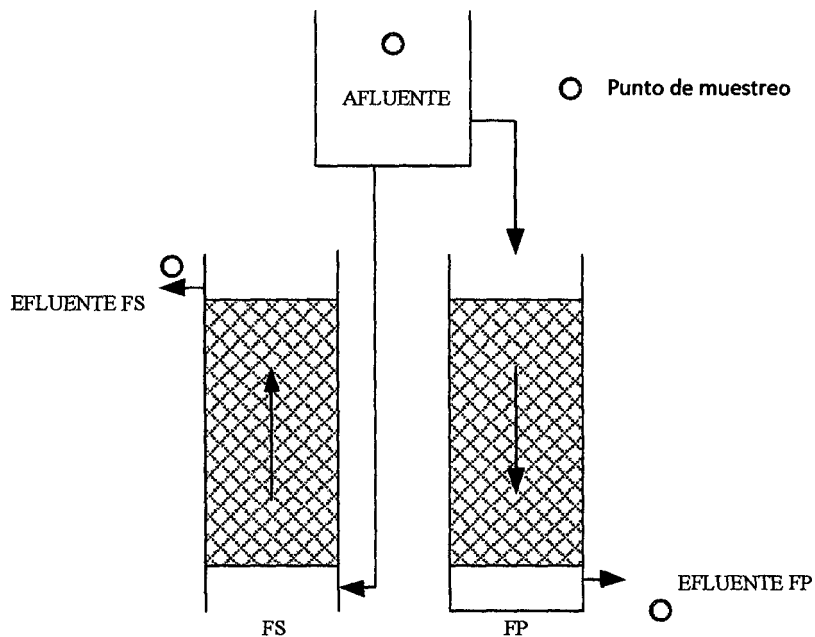


Figura 2.6: Operación del sistema individual sin inyección de aire

Filtro sumergido

La unidad operó en forma individual, se aplicó un caudal constante de 1.5ml/s de agua residual al sistema, el flujo fue de manera ascendente en la unidad.

Filtro percolador

La unidad operó de forma individual, se aplicó un caudal constante de 1.5 ml/s de agua residual.

➤ **FS y FP operando en forma individual sin inyección de aire**

Por un periodo de 20 días el sistema operó en serie, después de la etapa de funcionamiento de forma individual que fue por 20 días, se aplicó un caudal constante de 1.5 ml/s.

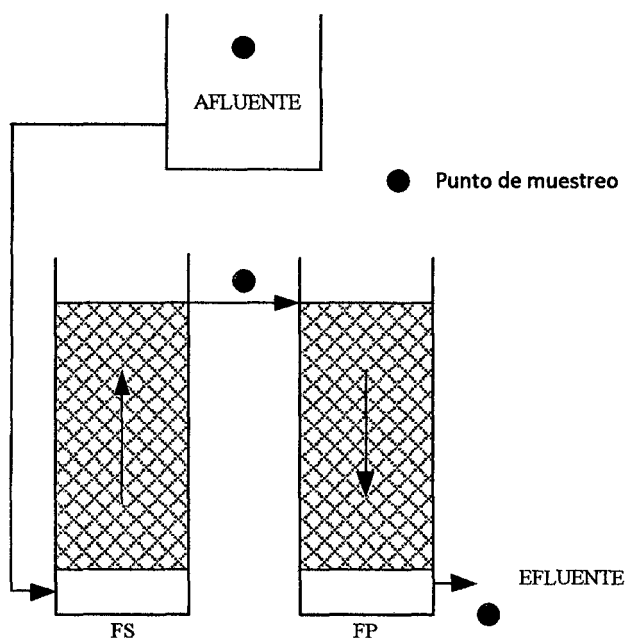


Figura 2.7: Operación del sistema en serie sin inyección de aire

2.4.5 Operación del sistema de filtración según tratamientos

Dosificación de agua residual:

El agua proveniente del efluente de un tanque séptico se depositó diariamente en el tanque de almacenamiento de capacidad de 80 litros, luego se bombeó el agua al tanque elevado (tanque de regulación) a 2 m de altura del suelo, la bomba se activa cuando el tanque de regulación baja a un nivel límite de agua y se apaga cuando es llenado hasta el nivel máximo, producto de la acción del interruptor de nivel colocado en la tapa del tanque de regulación, manteniéndolo siempre con un nivel de agua residual. En la base a ambos lados del tanque de regulación se ubicó dos válvulas esféricas de ½ pulgada para la salida de agua residual hacia los reactores, de esta manera se pudo regular a un caudal de 1.5ml/s haciendo uso de una probeta y cronómetro.

El caudal regulado fue distribuido por gravedad al filtro percolador y filtro sumergido,

Para el filtro percolador el agua se distribuyó a través de una ducha de 8 pulgadas de diámetro que encajó perfectamente en la columna del filtro percolador, siguiendo luego un flujo pistón. Para el filtro sumergido el agua ingresó a 3 cm de la base de la columna de acrílico por medio de una manguera de $\frac{3}{4}$ de pulga, empleando el principio de vasos comunicantes. La alimentación a ambos filtros con agua residual fue constante desde el tanque de regulación.

Medio filtrante:

Se empleó como medio filtrante para ambas unidades anillos de polipropileno corrugado de $\frac{3}{4}$ de diámetro y 2.5 cm de longitud, colocados al azar, formando una altura de 1.3 m en ambos filtros. En el filtro percolador el agua pasa por las paredes de los anillos y no se llega a inundar, en el filtro sumergido los anillos estuvieron sumergidos en el agua residual durante el periodo de experimentación con un flujo ascendente.

Inyección de aire artificial:

Ambas unidades de tratamiento fueron suministradas con 8 L/min de aire de forma artificial por dos bombas y empleando un sistema de inyección de aire, a través de dos platos con tres difusores tipo piedra cada uno, instalados a 10 cm de la base dentro de ambos filtros.

El sistema de aireación permitió la respiración endógena de los microorganismos así como la oxidación de la materia orgánica y consumo de nutrientes, en consecuencia se favoreció el crecimiento de microorganismos adheridos a la superficie del medio filtrante, formando una película biológica (biofilm), que se alimentó de la materia orgánica contenida en las aguas residuales que ingresaron al reactor.

2.4.6 Toma y caracterización de muestras

Toma de muestras

Se tomaron muestras simples, la cantidad de muestras tomadas fue un total de 24 muestras de 500 ml en toda la investigación, para la medición de DBO, DQO, SST, pH, turbiedad y temperatura,

Los puntos de muestreo son los indicados en las figuras 2.4 a 2.7 y se detallan en la tabla 2.2.

Tabla N° 2.2: Muestras tomadas en la experimentación

N° muestreo	N° días	Fecha	Punto de muestreo	N° muestras	Etapas
01	15	16/07/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	Individual (FP y FS)
02	15	31/07/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	
03	15	15/08/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	
04	15	30/08/2014	Afluyente, efluente FS y FP, alturas del FS y Recirculación de FP	6	
05	20	19/09/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	En serie (FS+FP)
06	20	09/10/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	Individual (FP y FS)
07	20	29/10/2014	Afluyente, efluente FS y FP.	3	En serie (FS+FP)

Fuente: Elaboración propia, 2014.

La toma de muestra se realizó según los tratamientos de la investigación

Toma de muestras para el tratamiento 1: Con inyección de aire

La toma de muestras en este tratamiento fue para determinar la evolución de la remoción de DBO, DQO y SST en el tiempo, la toma de muestras se realizó a los 15, 30, 45, 60 y 80 días desde el arranque del sistema de filtración biológica, en tres puntos: en el tanque de regulación, a la salida del filtro sumergido y a la salida del filtro percolador. Las unidades de tratamiento estuvieron operando de manera individual hasta los 60 días y 20 días más como un sistema en serie, completando 80 días con inyección de aire artificial.

Toma de muestras para el tratamiento 2: Sin inyección de aire

En este tratamiento la toma de muestras fue para determinar la evolución de la remoción de DBO, DQO y SST sin la inyección de aire artificial, la toma de muestras se realizó a los 100 y 120 días desde el arranque del sistema de filtración biológica, en tres puntos: en el tanque de regulación, a la salida del filtro sumergido y a la salida del filtro percolador. Las unidades de tratamiento estuvieron operando de manera individual por 20 días sin la inyección de aire y como un sistema en serie por 20 días más, completando 40 días sin inyección de aire artificial.

Caracterización de las muestras.

La caracterización de las muestras obtenidas, antes y después del tratamiento, fue realizada en situ en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín para los parámetros temperatura y pH, para los parámetros turbiedad, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales (SST) la caracterización fue realizada en el Laboratorio Anaquímicos de la ciudad de Moyobamba.

Métodos de análisis

La metodología empleada en los análisis de agua para cada parámetro establecido en la investigación se presenta en la tabla N° 2.3:

Tabla N° 2.3: Métodos empleados para la Parámetros físico, químicos y biológicos.

N°	PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO
1	Temperatura	°C	Termómetro de mercurio
2	pH	Unidad pH	Método de potenciométrico
3	Turbiedad	UNT	Método por Espectrofotométrico
4	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	Método por Espectrofotométrico
5	DBO	mg/l	Método por Espectrofotométrico
6	DQO	mg/l	Método por Espectrofotométrico

Fuente: Elaboración propia, 2014.

2.4.7 Identificación de algunos microorganismos presentes en la biopelícula del medio filtrante

Se realizó observación directa con un microscopio óptico en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín

2.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

La presentación de los datos obtenido se hizo en tablas, y se compararon con “Límites Máximos Permisibles para Descargas de Efluentes de las Plantas de Tratamiento o Municipales”.

La presentación gráfica de las eficiencias de remoción obtenidas tanto en el Tratamiento 1 y Tratamiento 2 se presentaron en gráficos, la ecuación general para el cálculo de las eficiencias fue:

$$\% \text{Eficiencia} = \left(\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100 \right)$$

Dónde:

S_o = concentración del parámetro SST, DBO o DQO en el afluente, mg/l

S_e = concentración del parámetro SST, DBO o DQO en el efluente, mg/l.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Resultados

3.1.1 Concentración de los parámetros fisicoquímicos en el afluente y efluente de las unidades de tratamiento

En este numeral presentamos los resultados obtenidos de siete muestreos realizados en diferentes puntos de las unidades de tratamiento conformado por un filtro sumergido (FS), un filtro percolador (FP) y cuando ambas unidades formaron un sistema de tratamiento biológico en serie (FS+FP). Los muestreos se realizaron según los tratamientos aplicados en la investigación, en cada tabla también se presentan los valores establecidos en los L.M.P para su comparación.

Tabla N° 3.1: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 15 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP	
Turbiedad	N.T.U.	65.0	10.0	28.6	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.4	7.1	6.7	6.5-8.5
T°	°C	22.8	22.1	22.6	<35
SST	mg/L	205	58	102	150
DBO	mg/L	257	75	98	100
DQO	mg/L	395	155	185	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.1 presenta los resultados obtenidos del primer muestreo que se tomó después de 15 días desde el inicio de funcionamiento de las unidades de tratamiento. Se puede apreciar que las concentraciones de los parámetros redujeron considerablemente en el efluente del FP y FS, respecto a las concentraciones del afluente, cumpliendo con lo establecido en los L.M.P.

Tabla N° 3.2: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 30 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP	
Turbiedad	N.T.U.	82.0	11.2	30.1	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.1	7.3	6.6	6.5-8.5
T°	°C	22.3	22.0	22.2	<35
SST	mg/L	212	49	105	150
DBO	mg/L	275	36	109	100
DQO	mg/L	412	122	193	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.2 presenta los resultados obtenidos del segundo muestreo que se tomó después de 30 días desde el inicio de funcionamiento de las unidades de tratamiento. Se puede apreciar que las concentraciones de los parámetros, tanto del efluente del FS y FP, cumplen con los L.M.P, excepto la concentración de DBO del efluente del FP, que excede en 9 mg/l lo establecido en los L.M.P, esto se puede deber a que moscas *Psychoda* aparecieron después del primer muestreo, afectando negativamente a la remoción.

Tabla N° 3.3: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 45 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP	
Turbiedad	N.T.U.	58.9	9.7	27.9	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.4	7.0	6.7	6.5-8.5
T°	°C	22.8	22.2	22.6	<35
SST	mg/L	194	38	85	150
DBO	mg/L	243	29	67	100
DQO	mg/L	389	66	113	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.3 presenta los resultados obtenidos del tercer muestreo que se tomó después de 45 días desde el inicio de funcionamiento de las unidades de tratamiento. Se puede apreciar que las concentraciones de los parámetros, tanto del efluente del filtro sumergido como del filtro percolador, cumplen con lo establecido en los L.M.P. Se obtuvieron valores en los efluentes considerablemente menores a los de los muestreos 1 y 2.

Tabla N° 3.4: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 60 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo						L.M.P
		Afluente	40 cm Altura FS	80 cm Altura FS	Efluente FS	Efluente FP	Efluente FP recirculado 100%	
Turbiedad	N.T.U.	67	28.2	16.8	11.3	30.2	25.1	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.2	6.3	6.9	7.28	6.6	6.9	6.5-8.5
T°	°C	22.3	22.3	22.3	22.2	22.4	22.2	<35
SST	mg/L	186	121	72	41	68	64	150
DBO	mg/L	251	125	67	21	58	36	100
DQO	mg/L	401	237	128	59	93	62	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.4 presenta los resultados del cuarto muestreo que se tomó después de 60 días desde el inicio de funcionamiento de las unidades de tratamiento. En este punto de la experimentación además de los puntos de muestreo tomados anteriormente se obtuvieron muestras de 40 cm y 80 cm de altura del medio filtrante del filtro sumergido y otra muestra al efluente de la recirculación al 100 % en el filtro percolador. A 40 cm de altura del FS solo SST cumple con los L.M.P y a 80 cm del FS ya todos los parámetros cumplen con los LMP. La recirculación en el FP ayudó a disminuir la concentración tanto de turbiedad, SST, DBO y DQO cumpliendo ampliamente con los L.M.P. El aumento de la remoción de las concentraciones de SST, DBO y DQO se debe al crecimiento de biofilm en el medio filtrante, llegando hasta este punto estabilidad del sistema.

Tabla N° 3.5: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 80 días con inyección de aire cuando las unidades funcionaron en un sistema en serie

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP (efluente final FS+FP)	
Turbiedad	N.T.U.	69.3	11.5	11	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.6	7.18	6.9	6.5-8.5
T°	°C	22.75	22.6	22.6	<35
SST	mg/L	198	36	34	150
DBO	mg/L	262	16	12	100
DQO	mg/L	408	51	43	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.5 presenta los resultados obtenidos a 80 días del inicio de funcionamiento de las unidades con inyección de aire, cuando las unidades funcionaron como un sistema en serie por 20 días después de la toma del quinto muestreo. Se puede observar que el efluente final del sistema en serie cumple ampliamente con lo establecido en los L.M.P, logrando concentraciones inferiores a los obtenidos cuando las unidades funcionaron en forma individual.

Tabla N° 3.6: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 20 días sin inyección de aire cuando las unidades funcionaron en forma individual

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP	
Turbiedad	N.T.U.	71.2	14.8	13.4	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.2	6.8	6.8	6.5-8.5
T°	°C	22.4	22.5	22.3	<35
SST	mg/L	205	71	73	150
DBO	mg/L	270	62	69	100
DQO	mg/L	412	117	114	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.6 presenta los resultados del sexto muestreo a 100 días del inicio de experimentación. Las unidades de tratamiento funcionaron de forma individual y sin la inyección de aire artificial por 20 días después de la realización del quinto muestreo. Las concentraciones en los efluentes del FS y FP son mayores con respecto al tratamiento con inyección de aire, aunque cumplen con lo establecido en los L.M.P. Evidencia que la inyección de aire influye una mayor eficiencia de remoción de las concentraciones de DBO, DQO y SST por el FS, siendo considerable una en baja en la remoción cuando no se inyectó aire artificial. Para el caso del FP las concentraciones aumentaron solo ligeramente respecto a las obtenidas cuando se inyectó aire, en este caso no fue significativa la diferencia de remoción de los tratamientos con y sin inyección de aire.

Tabla N° 3.7: Concentración de los parámetros fisicoquímicos a 40 días sin inyección de aire cuando las unidades funcionaron en un sistema en serie

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			L.M.P
		Afluente	Efluente FS	Efluente FP (efluente final FS+FP)	
Turbiedad	N.T.U.	67.4	15.1	14.2	-
pH	Potencial de Hidrógeno	6.3	6.7	6.8	6.5-8.5
T°	°C	22.1	22.2	22.2	<35
SST	mg/L	193	45	54	150
DBO	mg/L	258	47	38	100
DQO	mg/L	394	97	69	200

Fuente: Laboratorio Anaquímicos

La tabla N° 3.7 presenta los resultados del séptimo muestreo a 120 días del inicio de la experimentación, cuando las unidades de tratamiento funcionaron como un sistema en serie sin la inyección de aire artificial por 20 días después de la realización del quinto muestreo. Las concentraciones en los efluentes del sistema FS+FP son mayores con respecto al tratamiento con inyección de aire, aunque cumplen con lo establecido en los L.M.P. Aquí también se puede evidenciar que la inyección de aire influye en una mayor eficiencia de remoción de las concentraciones de DBO, DQO y SST por parte del sistema en serie.

3.1.2 Eficiencia de remoción del filtro Sumergido (FS)

Se presentan las eficiencias del FS en la remoción de SST, DBO y DQO en un tiempo de 80 días desde el inicio de operación con inyección de aire y 40 días sin la inyección de aire artificial, luego se comparan las eficiencias para los tratamientos con y sin inyección de aire artificial. También se presenta las eficiencias de remoción en 3 alturas del medio filtrante del filtro sumergido cuando se inyectó aire artificial.

A. Eficiencia del Filtro sumergido con inyección de aire artificial

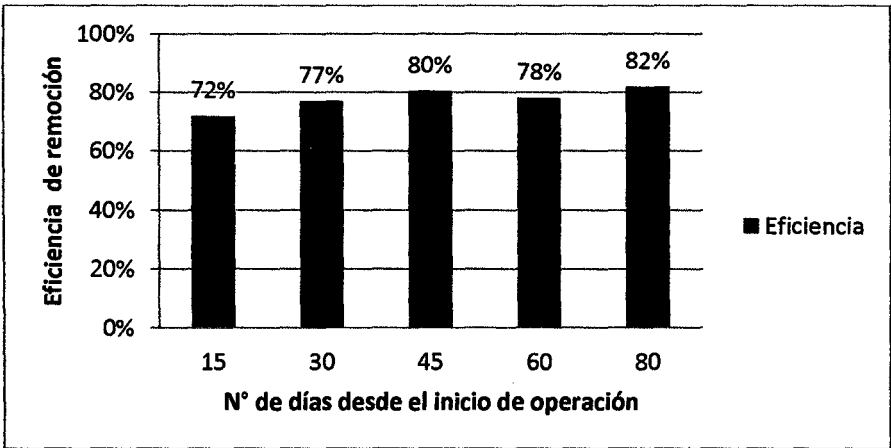
➤ **Eficiencia del Filtro Sumergido para la remoción de SST**

Tabla N° 3.8: Eficiencia del FS para la remoción de SST con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (So)	Efluente mg/l (Se)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	205	58	72%
2	30	212	49	77%
3	45	194	38	80%
4	60	186	41	78%
5	80	198	36	82%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 /Elaboración propia

Grafico N° 3.1: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de SST con inyección de aire artificial



Fuente: Tabla 3.8 /Elaboración propia

El gráfico 3.1, muestra la evolución de la eficiencia del FS en la remoción del parámetro sólidos suspendidos totales (SST) con inyección de aire, a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de 72 % y la máxima eficiencia de 82 % se alcanza a los 80 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, verificándose que se llega a porcentajes similares de remoción (estabilización de remoción) a partir de los 45 días de inicio de funcionamiento de la unidad.

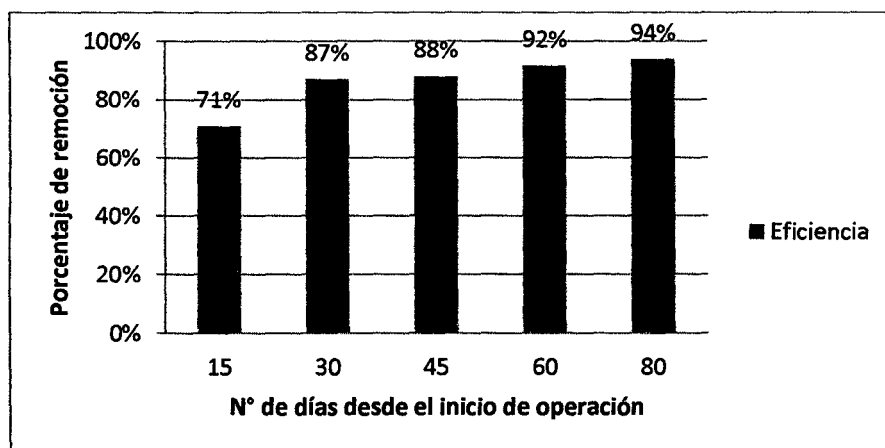
➤ **Eficiencia del filtro sumergido para la remoción de DBO**

Tabla N° 3.9: Eficiencia del FS para la remoción de DBO con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (So)	Efluente mg/l (Se)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	257	75	71%
2	30	275	36	87%
3	45	243	29	88%
4	60	251	21	92%
5	80	262	16	94%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 /Elaboración propia

Grafico N° 3.2: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de DBO con inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.9

El gráfico 3.2, muestra la evolución de la eficiencia del filtro sumergido de flujo ascendente en la remoción del parámetro demanda bioquímica de oxígeno (DBO), a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de

71% y la máxima eficiencia de 94% se alcanza a los 80 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, verificándose que se llega a porcentajes similares de remoción (estabilización de remoción) a partir de los 60 días de inicio de funcionamiento de la unidad.

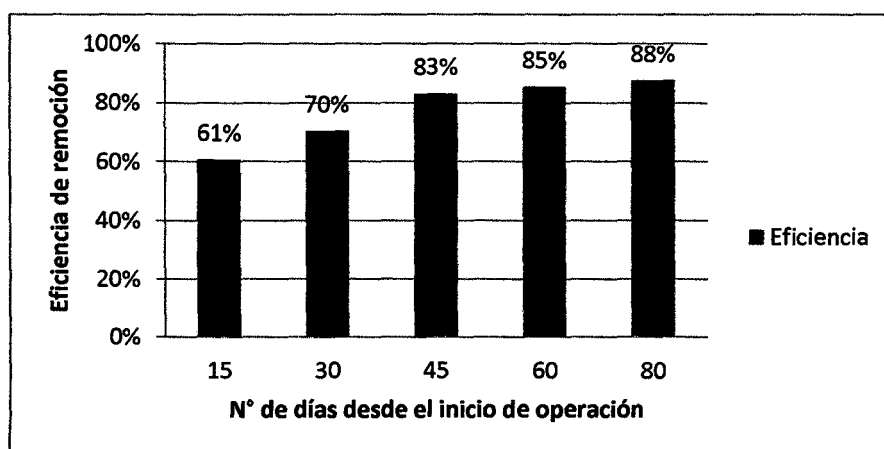
➤ **Eficiencia del filtro sumergido para la remoción de DQO**

Tabla N° 3.10: Eficiencia del FS para la remoción de DQO con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (S _o)	Efluente mg/l (S _e)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	395	155	61%
2	30	412	122	70%
3	45	389	66	83%
4	60	401	59	85%
5	80	408	51	88%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5

Grafico N° 3.3: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FS para la remoción de DQO con inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.10

El gráfico 3.3, muestra la evolución de la eficiencia del filtro sumergido de flujo ascendente en la remoción del parámetro demanda química de oxígeno (DQO), a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de 61% y la máxima eficiencia de 88% se alcanza a los 80 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, verificándose que se llega a porcentajes

similares de remoción (estabilización de remoción) a partir de los 40 días de inicio de funcionamiento de la unidad.

En los gráficos presentados de la remoción de SST, DBO y DQO se puede apreciar como la eficiencia de remoción de los parámetros va aumentando conforme pasa el tiempo, llegando a un punto de estabilización, Esto debido a que los microorganismos se van adaptando y desarrollando en el medio filtrante, encontrando las condiciones de nutrientes y oxígeno para su desarrollo.

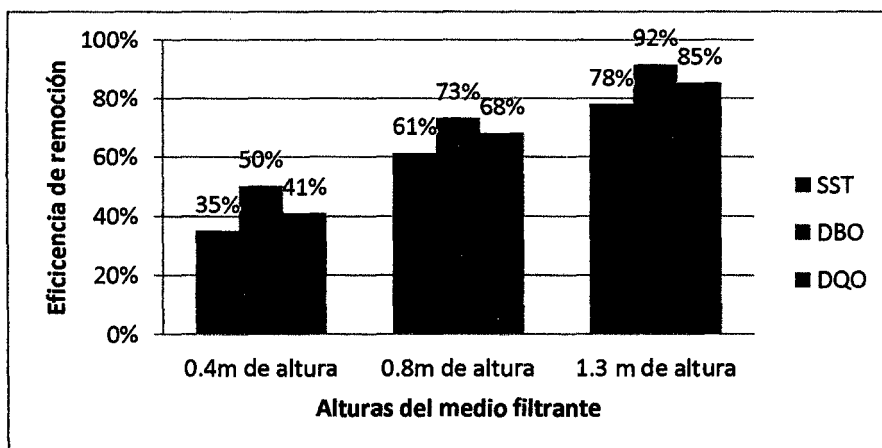
➤ **Eficiencia de remoción a diferentes alturas del medio filtrante del filtro sumergido**

Tabla N° 3.11: Eficiencia de remoción del filtro sumergido a diferentes alturas del medio filtrante

Parámetro	Unidad	Afluente (S _o)	Efluente a 0.4 m (S _e)1	Eficiencia 0.4 m $\frac{S_o - S_{e1}}{S_o} * 100$	Efluente a 0.8 m (S _e)2	Eficiencia 0.4 m $\frac{S_o - S_{e2}}{S_o} * 100$	Efluente a 0.8 m (S _e)3	Eficiencia 1.3 m $\frac{S_o - S_{e3}}{S_o} * 100$
SST	mg/l	186	121	35%	72	61%	41	78%
DBO	mg/l	251	125	50%	67	73%	21	92%
DQO	mg/l	401	237	41%	128	68%	59	85%

Fuente: Tabla N° 3.5

Gráfico N° 3.4: Eficiencia de remoción del filtro sumergido a diferentes alturas del medio filtrante



Fuente: Tabla N° 3.11

El gráfico 3.4, muestra el porcentaje de eficiencia del filtro sumergido en la remoción de los parámetros SST, DBO y DQO. A 0.4 m de altura se obtuvieron eficiencias de 35%, 50% y 41% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente. A 0.8 m de altura se obtuvieron eficiencias de 61%, 73% y 68 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente. A 1.3 m (salida del filtro sumergido) se obtuvieron eficiencias de 78%, 92 y 85 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

Se puede evidenciar que las eficiencias van aumentando conforme el agua residual pasa a mayor altura del medio filtrante, esto se debe a que a medida que va ascendiendo el agua residual tiene mayor contacto con el medio filtrante, lo cual permite que los microorganismo adheridos al medio se alimenten de la materia orgánica y nutrientes que se encuentran en el agua residual, de esta manera oxidan la materia orgánica con lo cual se disminuye las concentraciones de DBO, DQO y SST.

En la imagen N° 3.1 se puede apreciar la eficiencia del filtro sumergido en las tres alturas medidas.

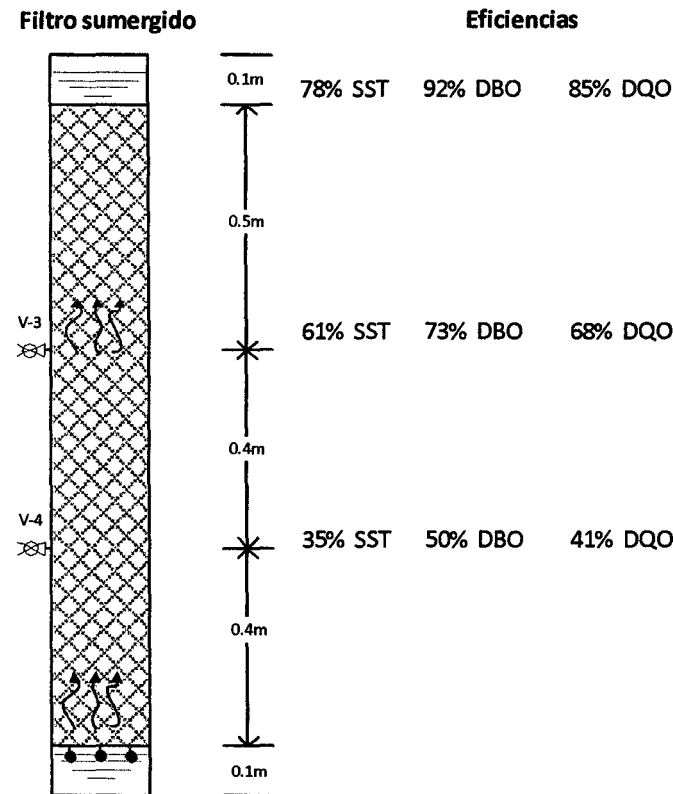


Figura 3.1: Eficiencia a diferentes alturas del filtro sumergido

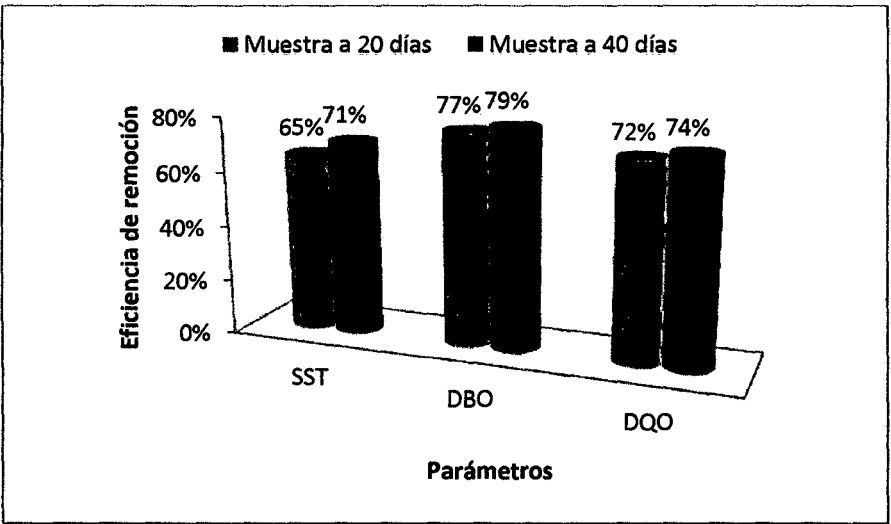
B. Eficiencia del filtro sumergido sin inyección de aire

Tabla N° 3.12: Eficiencia del filtro sumergido sin la inyección de aire artificial

Parámetro	Unidad	Muestra a 20 días			Muestra a 40 días		
		Afluyente mg/l (So)1	Efluente mg/l (Se)1	Eficiencia $\frac{S_{o1} - S_{e1}}{S_{o1}} * 100$	Afluyente mg/l (So)2	Efluente mg/l (Se)2	Eficiencia $\frac{S_{o2} - S_{e2}}{S_{o2}} * 100$
SST	mg/l	205	71	65%	193	56	71%
DBO	mg/l	269,5	62	77%	258	53	79%
DQO	mg/l	412	117	72%	394	102	74%

Fuente: Tablas N° 3.6 y 3.7

Grafico N° 3.5: Eficiencia del filtro sumergido sin la inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.12

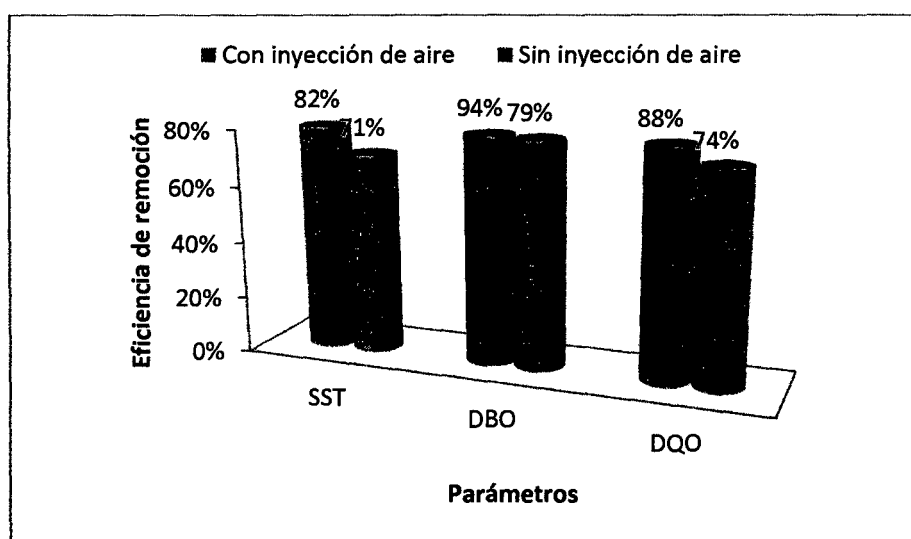
En el gráfico 3.5, a 20 días del funcionamiento sin inyección de aire artificial se obtuvieron eficiencias de 65%, 77% y 72 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente. A 40 días del funcionamiento sin inyección de aire artificial se obtuvieron valores de 71%, 79% y 74% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

La baja en la eficiencia se debe a que se pasó de un proceso de tratamiento aerobio-facultativo a un proceso facultativo-anóxico-anaeróbico, como resultado hay una baja en el proceso de conversión de materia orgánica en células biológicas (disminución de microorganismos), por lo cual la materia orgánica y nutrientes del agua residual no disminuyen al ritmo del proceso aerobio. Sin embargo no fue un proceso anaerobio propiamente, sino facultativo por que el oxígeno llega hasta cierta profundidad del filtro sumergido.

C. Comparación de la eficiencia del filtro sumergido con y sin inyección de aire artificial

Se realizó la comparación de la eficiencia del filtro sumergido de flujo ascendente para los tratamientos realizados con y sin inyección de aire a partir de las eficiencias presentadas en la tabla N° 3.8 para SST, tabla 3.9 para DBO y tabla 3.10 para DQO, todas del muestreo cinco con inyección de aire y para las eficiencias sin inyección de aire artificial con los resultados de la tabla N° 3.12 del muestreo número siete.

Grafico N° 3.6: Comparación de la eficiencia del filtro sumergido con inyección y sin la inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.8, N° 3.9, N° 3.10 y N° 3.12

Del gráfico 3.6 se puede deducir que con la inyección de aire artificial, el filtro sumergido de flujo ascendente obtuvo mayores eficiencias en un 11%, 15% y 14% para la remoción de los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente, respecto a las eficiencias del tratamiento sin la inyección de aire artificial.

Se puede verificar que el proceso con inyección de aire es más eficiente que el proceso sin la inyección de aire porque en un proceso aerobio la oxidación por acción del oxígeno produce mayor energía requerida para el crecimiento de los microorganismos aerobios, a diferencia del proceso anaerobio que por el propio catabolismo de los microorganismos anaerobios tienen requerimientos nutricionales bajos, produciendo menos energía y traduciéndose en menor eficiencia de remoción de materia orgánica.

3.1.3 Eficiencia de remoción del filtro percolador (FP)

Se presentan las eficiencias del FP en la remoción de SST, DBO y DQO en un tiempo de 60 días desde el inicio de operación con inyección de aire y 20 días sin la inyección de aire artificial, luego se comparan las eficiencias para los tratamientos con y sin inyección de aire artificial.

También se presenta la influencia de la recirculación al 100% en la eficiencia de remoción del FP cuando se inyectó aire artificial.

A. Eficiencia del filtro percolador con inyección de aire

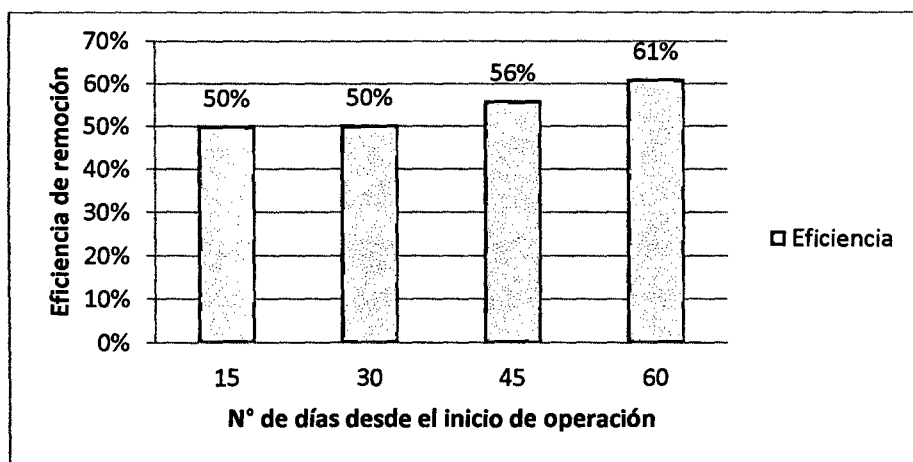
➤ Eficiencia del filtro percolador para la remoción de SST

Tabla N° 3.13: Eficiencia del FP para la remoción de SST con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (S _o)	Efluente mg/l (S _e)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	205	102	50%
2	30	212	105	50%
3	45	194	85	56%
4	60	186	72	61%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4

Grafico N° 3.7: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de SST con inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.13

El gráfico 3.7, muestra la evolución de la eficiencia del filtro percolador en la remoción del parámetro SST, a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de 50 % y la máxima eficiencia de 61 % se alcanza a los 80 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, se verifica que en los 30 primeros días la eficiencia de remoción fue de 50%, esto puede deberse a que después de la toma de la primera muestra a los 15 días de funcionamiento aparecieron larvas *Psychoda*, alimentándose estas larvas del de los microorganismos del medio filtrante, no permitiendo que la eficiencia aumente en el segunda muestreo que fue a 30 días del inicio de funcionamiento.

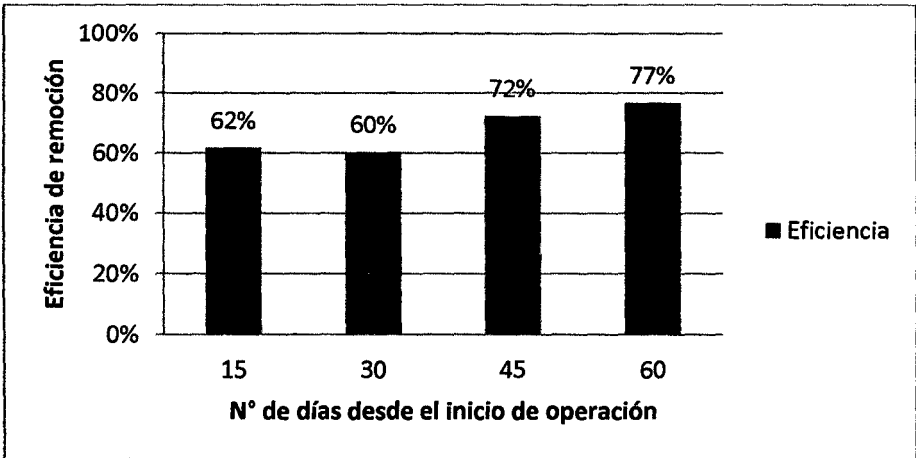
➤ **Eficiencia del filtro percolador para la remoción de DBO**

Tabla N° 3.14: Eficiencia del FP para la remoción de DBO con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (So)	Efluente mg/l (Se)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	257	98	62%
2	30	275	109	60%
3	45	243	67	72%
4	60	251	58	77%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4

Grafico N° 3.8: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de DBO con inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.14

El gráfico 3.8, muestra la evolución de la eficiencia del filtro percolador en la remoción del parámetro DBO, a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de 62 % y la máxima eficiencia de 77 % se alcanza a los

80 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, se verifica que en los 30 primeros días la eficiencia de remoción fue de 60%, menor al 62% de la muestra de los primeros 15 días, esto puede deberse a que después de la toma de la primera muestra a los 15 días de funcionamiento aparecieron larvas *Psychoda*, alimentándose estas larvas del de los microorganismos del medio filtrante, no permitiendo que la eficiencia aumente en el segunda muestreo que fue a 30 días del inicio de funcionamiento.

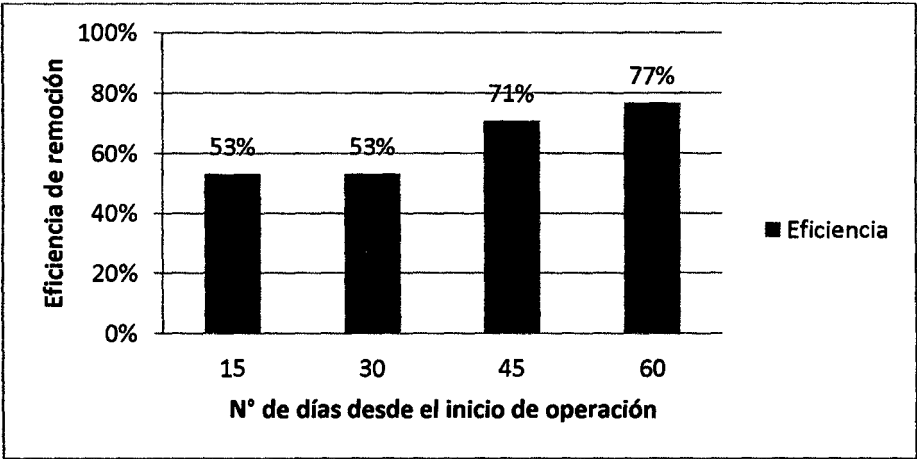
➤ **Eficiencia del filtro percolador para la remoción de DQO**

Tabla N° 3.15: Eficiencia del FP para la remoción de DQO con inyección de aire artificial

N° Muestra	N° días	Afluente mg/l (So)	Efluente mg/l (Se)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
1	15	395	185	53%
2	30	412	193	53%
3	45	389	113	71%
4	60	401	93	77%

Fuente: Tablas N° 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4

Grafico N° 3.9: Evolución en el tiempo de la eficiencia del FP para la remoción de DQO con inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.15

El gráfico 3.9, muestra la evolución de la eficiencia del filtro percolador en la remoción del parámetro DQO, a los 15 días de la operación del sistema se observa una eficiencia de 53 % y la máxima eficiencia de 77 % se alcanza a los 60 días. La tendencia de remoción en el tiempo es creciente, se verifica que en

los 30 primeros días la eficiencia de remoción fue de 53%, igual a la muestra de los primeros 15 días, esto puede deberse a que después de la toma de la primera muestra a los 15 días de funcionamiento aparecieron larvas *Psychoda*, alimentándose estas larvas de los microorganismos del medio filtrante, no permitiendo que la eficiencia aumente en el segundo muestreo que fue a 30 días del inicio de funcionamiento.

Se puede apreciar como la eficiencia de remoción de los parámetros va aumentando conforme pasa el tiempo, llegando a un punto de estabilización, Esto debido a que los microorganismos se van adaptando y desarrollando en el medio filtrante, encontrando las condiciones de nutrientes y oxígeno para su desarrollo.

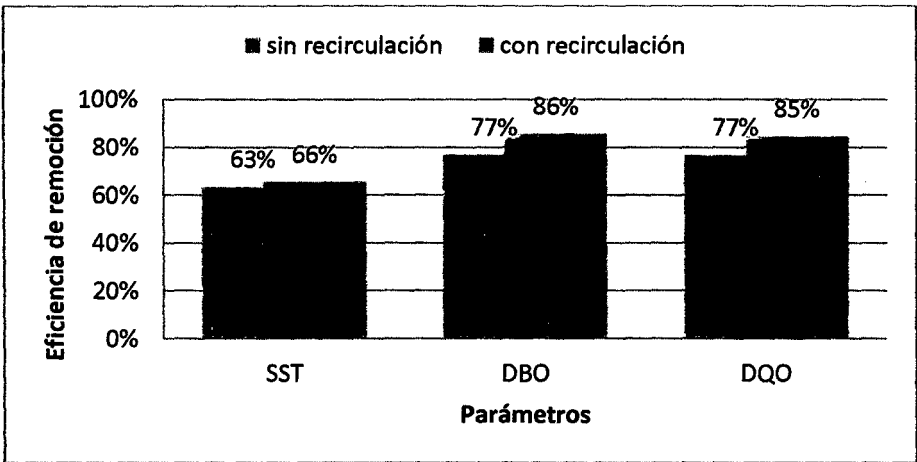
➤ **Influencia de la recirculación en la eficiencia de remoción del filtro percolador**

Tabla N° 3.16: Eficiencia del FP con y sin recirculación

Parámetro	Unidad	Afluente mg/l (S _o)	Efluente sin recirculación mg/l (S _e)1	Eficiencia 1 $\frac{S_o - S_{e1}}{S_o} * 100$	Efluente con recirculación mg/l (S _e)	Eficiencia 2 $\frac{S_o - S_{e2}}{S_o} * 100$
SST	mg/l	186	68	63%	64	66%
DBO	mg/l	251	58	77%	36	86%
DQO	mg/l	401	93	77%	62	85%

Fuente: Tablas N° 3.5

Grafico N° 3.10: Influencia de la recirculación en la eficiencia de remoción del filtro percolador



Fuente: Tabla N° 3.16

El gráfico 3.10 muestra que cuando no se recirculó el efluente del filtro percolador se obtuvo eficiencia de remoción de 63%, 77% y 86% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente. Cuando se recirculó el 100 % del efluente del filtro percolador se obtuvieron eficiencias de 66%, 86% y 85% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

Se evidencia que la recirculación influyó en la eficiencia en un 3% para la remoción de SST, de 9% para DBO y 8% para la remoción de DQO. Esto se debe a que el agua recirculada al mezclarse con el agua residual diluye la materia orgánica pasando una agua residual con menos concentrada y con microorganismos que se vuelven a fijar en la parte superior del medio filtrante.

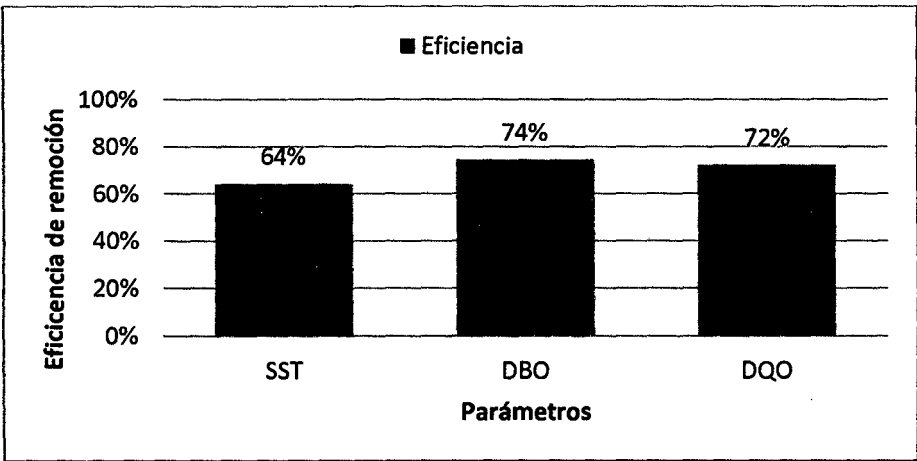
B. Eficiencia del filtro percolador sin la inyección de aire artificial

Tabla N° 3.17: Eficiencia del filtro percolador sin la inyección de aire artificial

N° Muestra	Parámetro	Unidad	Afluente (So)	Efluente (Se)	Eficiencia $\frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$
6	SST	mg/l	205	73	64%
	DBO	mg/l	269.5	69	74%
	DQO	mg/l	412	114	72%

Fuente: Tabla N° 3.6

Grafico N° 3.11: Eficiencia del filtro percolador sin la inyección de aire artificial



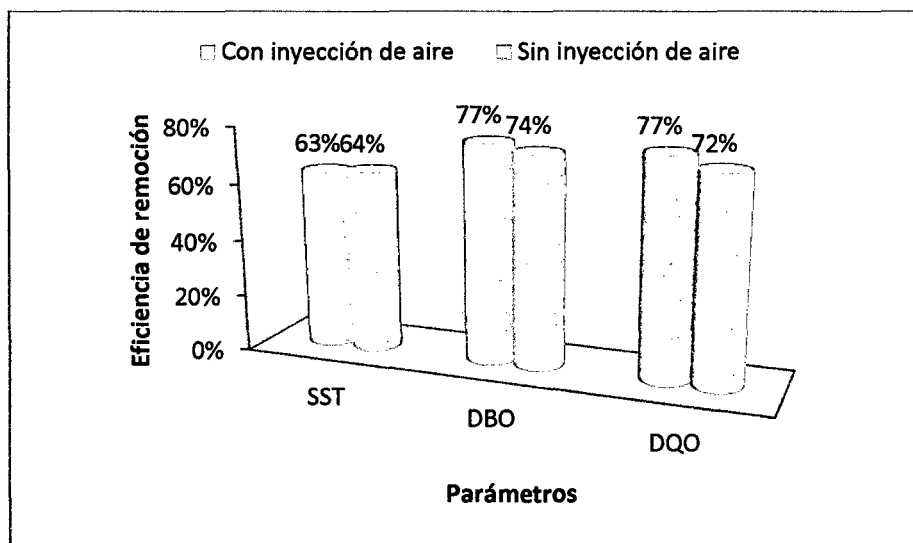
Fuente: Tabla N° 3.17 /Elaboración propia

El gráfico 3.11 muestra que a 20 días del funcionamiento sin inyección de aire artificial se obtuvieron eficiencias de 64%, 74% y 72 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

C. Comparación de la eficiencia del filtro percolador con y sin inyección de aire artificial

Se realizó la comparación de la eficiencia del filtro percolador para los tratamientos realizados con y sin inyección de aire a partir de las eficiencias presentadas en la tabla N° 3.13 para SST, tabla 3.14 para DBO y tabla 3.15 para DQO, todas del muestreo cuatro, con inyección de aire y para las eficiencias sin inyección de aire artificial con los resultados de la tabla N° 3.17 del muestreo número siete.

Grafico N° 3.12: Comparación de la Eficiencia del filtro percolador con inyección y sin la inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.13, N° 3.14, N° 3.15 y N° 3.17

Del gráfico 3.12 se puede deducir que con la inyección de aire artificial, el filtro percolador se obtuvo mayores eficiencias en un 1%, 3% y 5% para la remoción de los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente, respecto a las eficiencias obtenidas del tratamiento sin la inyección de aire artificial. Se observa en este caso que la diferencia de eficiencias en ambos tratamientos no varió significativamente.

Se puede verificar que el proceso con inyección de aire no fue considerablemente más eficiente que el proceso sin la inyección de aire porque el medio filtrante al no estar inundado permite la circulación del aire manteniendo el proceso aerobio facultativo a diferencia del filtro sumergido.

3.1.4 Eficiencia del sistema de tratamiento biológico en serie (FS+FP)

Se presentan las eficiencias de remoción de SST, DBO y DQO del sistema de tratamiento biológico en serie (FS+FP), los cuales funcionaron durante 20 días en el tratamiento con inyección de aire y 20 días en el tratamiento sin inyección de aire.

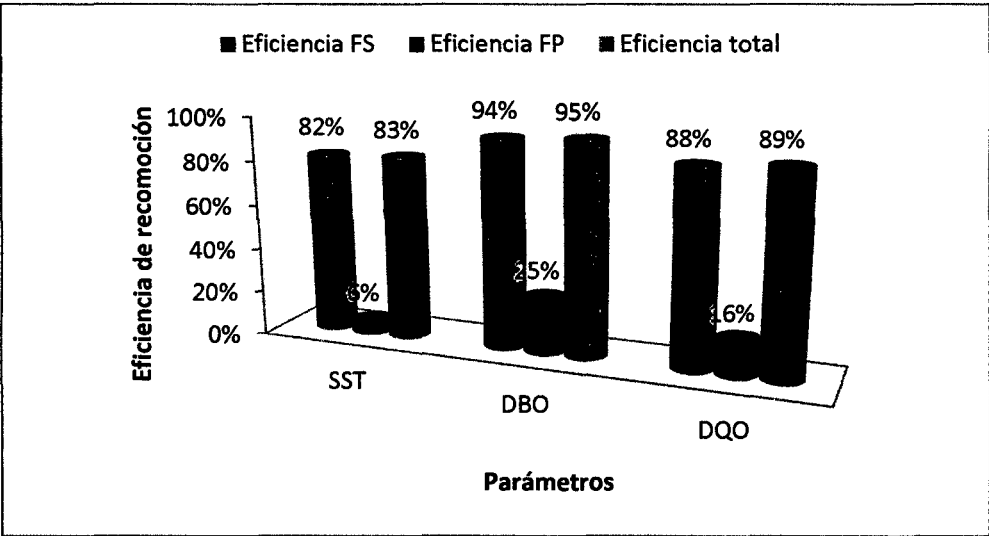
A. Eficiencia del sistema FS+FP con la inyección de aire

Tabla N° 3.18: Eficiencia del sistema biológico de tratamiento con inyección de aire artificial

Parámetro	Unidad	Afluente (So)	Efluente FS (Se)1	Eficiencia FS $\frac{S_o - S_{e1}}{S_o} * 100$	Efluente FP (Se)2	Eficiencia FP $\frac{S_{e1} - S_{e2}}{S_{e1}} * 100$	Eficiencia sistema FS+FP $\frac{S_o - S_{e2}}{S_o} * 100$
SST	mg/l	198	36	82%	34	6%	83%
DBO	mg/l	262	16	94%	12	25%	95%
DQO	mg/l	408	51	88%	43	16%	89%

Fuente: Tabla N° 3.5

Grafico N° 3.13: Eficiencia de remoción para el sistema de filtración biológico (FS+FP) con inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.18

El gráfico 3.13 muestra que durante los 20 días del funcionamiento del sistema de tratamiento biológico con inyección de aire artificial conformado por el filtro sumergido de flujo ascendente y el filtro percolador se obtuvieron

eficiencias de 82%, 94% y 88 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente a la salida del filtro sumergido, eficiencias de 6%, 25% y 16 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente a la salida del filtro percolador, esta eficiencia es respecto al efluente del filtro sumergido, y se nota una eficiencia menor debido a que las concentraciones de SST, DBO y DQO del efluente con que se alimentó el filtro percolador se encontraban reducidas debido a la eficiencia del filtro sumergido.

Se puede apreciar que la eficiencia final del sistema de filtración biológica a la salida del filtro percolador es de 83%, 95% y 89 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

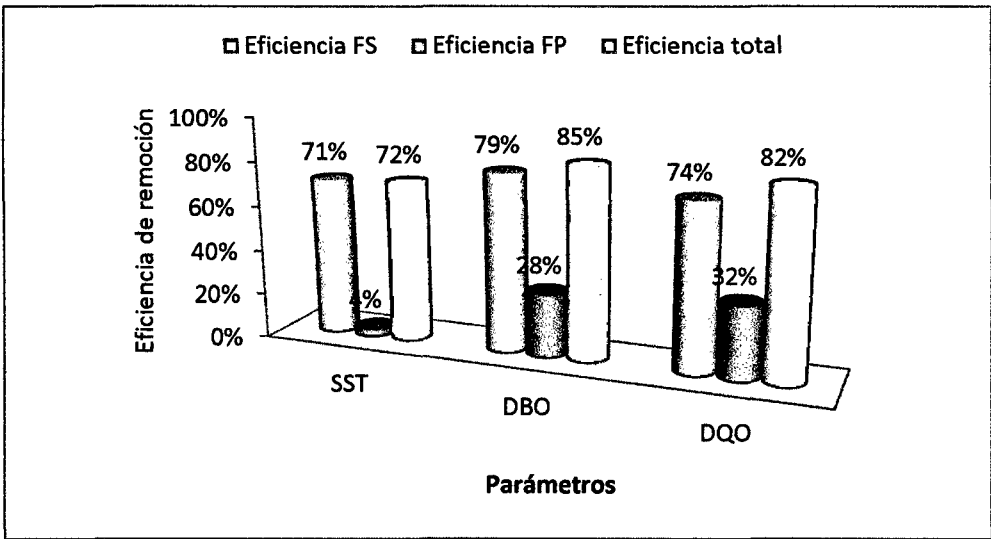
B. Eficiencia del sistema FS+FP sin la inyección de aire

Tabla N° 3.19: Eficiencia del sistema en serie sin la inyección de aire artificial

Parámetro	Unidad	Afluente (So)	Efluente FS (Se)1	Eficiencia FS $\frac{S_o - S_{e1}}{S_o} * 100$	Efluente FP (Se)2	Eficiencia FP $\frac{S_{o1} - S_{e2}}{S_{o1}} * 100$	Eficiencia sistema FS+FP $\frac{S_o - S_{e2}}{S_o} * 100$
SST	mg/l	193	56	71%	54	4%	72%
DBO	mg/l	258	53	79%	38	28%	85%
DQO	mg/l	394	102	74%	69	32%	82%

Fuente: Tabla N° 3.7

Grafico N° 3.14: Eficiencia de remoción para el sistema de filtración biológico (FS+FP) sin inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.19

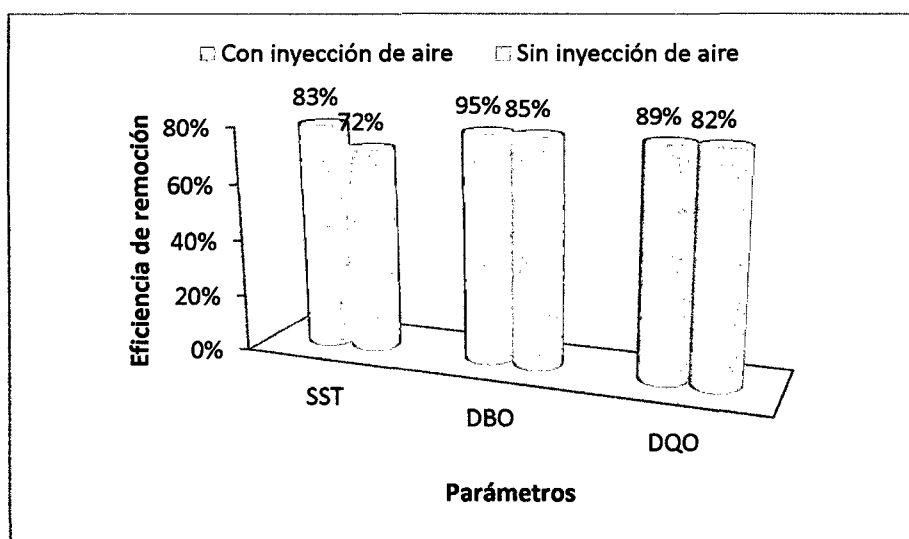
El gráfico 3.14 muestra que durante los 20 días del funcionamiento del sistema de tratamiento biológico sin inyección de aire artificial obtuvo eficiencias de 71%, 79% y 47% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente a la salida del filtro sumergido, eficiencias de 4%, 28% y 32 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente a la salida del filtro percolador, esta eficiencia es respecto al efluente del filtro sumergido, y se nota una eficiencia menor debido a que las concentraciones de SST, DBO y DQO del efluente con que se alimentó el filtro percolador se encontraban reducidas debido a la eficiencia del filtro sumergido.

Se puede apreciar que la eficiencia final del sistema de filtración biológica a la salida del filtro percolador es de 72%, 85% y 82 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

C. Comparación de la eficiencia del sistema de filtración biológica con y sin la inyección de aire artificial

Se realizó la comparación de la eficiencia del sistema de filtración biológico compuesto por el filtro sumergido de flujo ascendente y del filtro percolador para los tratamientos realizados con y sin inyección de aire a partir de las eficiencias presentadas en la tabla N° 3.18 y tabla N° 3.19.

Grafico N° 3.15: Comparación de la eficiencia del sistema de filtración biológica con y sin la inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.18 y N° 3.19

Del gráfico 3.15 se puede deducir que con la inyección de aire artificial, el sistema de filtración obtuvo mayores eficiencias en un 11%, 10% y 7% para la remoción de los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente, respecto a las eficiencias obtenidas en el tratamiento sin la inyección de aire artificial.

3.1.5 Comparación de la eficiencia alcanzadas del filtro sumergido con el filtro percolador operando de manera individual y en serie.

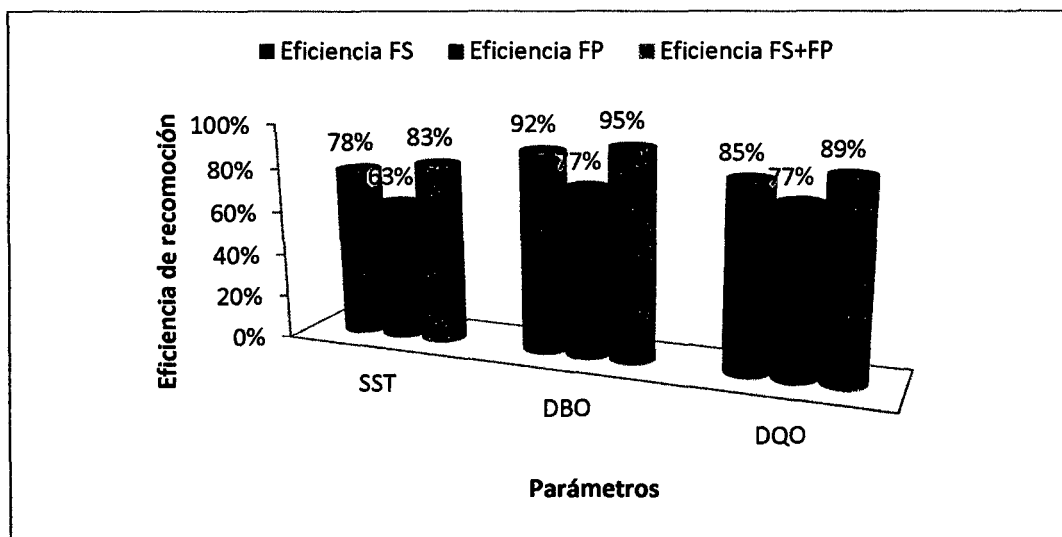
A. Comparación con inyección de aire artificial

Tabla N° 3.20: Comparación de las eficiencias alcanzadas del FS, FP y cuando las unidades operaron como un sistema en serie con la inyección de aire

Parámetro	Eficiencia FS	Eficiencia FP	Eficiencia FS+FP
SST	78%	63%	83%
DBO	92%	77%	95%
DQO	85%	77%	89%

Fuente: Tablas N° 3.4 y N° 3.5

Gráfico N° 3.16: Comparación de la eficiencia de remoción del FS, FP individual y en serie con la inyección de aire artificial



Fuente: Tablas N° 3.20

Del gráfico 3.16 se puede deducir que con la inyección de aire artificial, el filtro sumergido de flujo ascendente obtuvo mayores eficiencias en un 15% para SST, 15% para DBO y 8% para DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por filtro percolador. Se observa que con la inyección de aire artificial existen

diferencias considerables entre las eficiencias del filtro sumergido y del filtro percolador.

Con el sistema en serie se obtuvo mayores eficiencias en un 5% para SST, 3% para DBO y 4% para DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por filtro sumergido, observándose que no fue significativo para el caudal tratado la diferencia de eficiencias entre el filtro sumergido y cuando este funcionó en serie con el filtro percolador.

Respecto al filtro percolador el sistema en serie obtuvo mayores eficiencias en un 20% para SST, 18% para DBO y 12 % para DQO, verificándose que en este caso si fue significativo la diferencia de eficiencias.

B. Comparación sin inyección de aire artificial

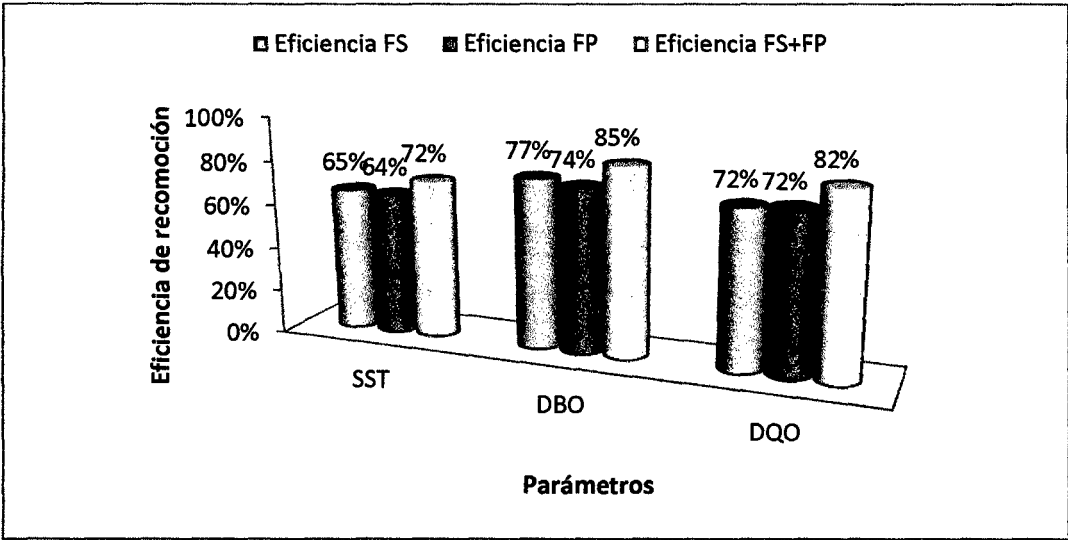
Con los resultados del muestreo seis (100 días desde el inicio de funcionamiento) para el filtro sumergido y filtro percolador, y del muestreo cinco (120 días desde el inicio de funcionamiento) para el sistema en serie, se calcularon las eficiencia presentadas en la tabla 3.21, para ser comparadas y determinar que unidad fue más eficiente en el tratamiento con inyección de aire, teniendo en cuenta que ambas unidades tuvieron características constructivas similares y alimentados con la misma agua residual con un caudal de 1.5 ml/s a cada unidad.

Tabla N° 3.21: Comparación de las eficiencias alcanzadas del FS, FP y cuando las unidades operaron como un sistema en serie sin la inyección de aire

Parámetro	Eficiencia FS	Eficiencia FP	Eficiencia FS+FP
SST	65%	64%	72%
DBO	77%	74%	85%
DQO	72%	72%	82%

Fuente: Tabla N° 3.6 y N° 3.7

Grafico N° 3.17: Comparación de la eficiencia de remoción del FS, FP individual y en serie sin inyección de aire artificial



Fuente: Tabla N° 3.21

Del gráfico 3.16 se puede deducir que sin la inyección de aire artificial, el filtro sumergido de flujo ascendente obtuvo mayores eficiencias en un 1% para SST, 3% para DBO e igual eficiencia para la remoción de DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por filtro percolador. Se verifica que sin la inyección de aire no hay diferencias considerables entre el filtro sumergido y el filtro percolador.

Con el sistema en serie se obtuvo mayores eficiencias en un 7% para SST, 8% para DBO y 10% para DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por filtro sumergido, observándose que para el caudal tratado la diferencia de eficiencias fue considerable entre el filtro sumergido y cuando este funcionó en serie con el filtro percolador. Respecto al filtro percolador el sistema en serie obtuvo mayores eficiencias en un 8% para SST, 11% para DBO y 10 % para DQO, verificándose que en existió una considerable diferencia de eficiencias.

3.2 Discusiones

La máxima eficiencia de remoción con el filtro sumergido se alcanzó a los 80 días desde el inicio de operación, cuando se alimentó con concentraciones de 198 mg/l, 262 mg/l y 405 mg/l para SST, DBO y DQO respectivamente, aplicando un caudal constante de 1.5 ml/s, lo cual equivale a una carga hidráulica de 4.125 m³/m².día y carga orgánica de 0.831 Kg.DBO/m³/d, se obtuvieron como resultado valores de 36 mg/l, 16 mg/l y 51 mg/l para SST, DBO y DQO respectivamente. Esto significa eficiencias de remoción de 82%, 94% y 88% para SST, DBO y DQO respectivamente.

Soto S. et al (2008) en su investigación para el caso específico de filtro sumergido aireado que emplearon, la máxima eficiencia alcanzada fue de aproximadamente 87% para la remoción de DQO, valor similar al 88% alcanzado en esta investigación.

Chui P.C. et al (2001) obtuvieron eficiencias de 98% en la remoción de DQO aplicando cargas de 5 kg DQO/m³.d, la eficiencia que obtuvieron fue mucho mayor al alcanzado en la presente investigación, esto se puede deber a que los filtros sumergidos de película adherida a mayor carga orgánica pueden alcanzar mayores eficiencias, como Chui P.C. et al (2001) aplicaron una carga orgánica 6 veces mayor comparada con el 0.831 Kg.DBO/m³/d con la que en el filtro sumergido obtuvo la mayor eficiencia con la inyección de aire artificial, su sistema alcanzó un 10% más eficiencia en la remoción de DQO.

Cecen y Gonenc, (1992) en su trabajo realizado, el sistema de filtros sumergidos que emplearon, alcanzó eficiencias cercanas al 99% de remoción de DQO, operando con cargas volumétricas de 5 kg DQO /m³.día.

Al igual que en la investigación de Chui P.C et al (2001), Cecen y Gonenc, (1992) obtuvieron altas eficiencias, evidenciándose que al emplear mayores cargas orgánicas se obtiene mejores eficiencias de remoción.

La mejores eficiencia de remoción alcanzado por el filtro percolador fue cuando se inyectó aire artificial, pero no varió considerablemente respecto a la eficiencia obtenida cuando no se inyectó aire al filtro percolador, aplicando un caudal constante de 1.5 ml/s lo cual equivale a una carga hidráulica de 4.125 m³/m².día y carga orgánica de 0.796 Kg.DBO/m³/d, las eficiencias de remoción máximas alcanzadas con el filtro percolador funcionando con inyección de aire artificial fueron de 63%, 77 % y 77% para SST, DBO y DQO respectivamente.

Reyes S., (2005) obtuvo eficiencias para la remoción de DQO que oscilaron entre 19.53% y 59.29% empleando altas cargas orgánicas en un filtro percolador con medio filtrante de 0.55 m de altura, alimentado con concentraciones de DQO que variaron de 2114.8 mg/l a 10175 mg/l a caudales de entre 10 y 60 l/d. Según manifiesta en sus resultados ella hace equivalencias con lo cual para la presente investigación, el filtro percolador alcanzaría eficiencias de remoción de DQO que oscilarían entre 46.16% a 140.14%, un valor no real sabiendo que las eficiencias son hasta la remoción total de 100%.

La máxima eficiencia que se obtuvo con el filtro percolador en la remoción de DQO fue de 77%., teniendo en cuenta que las características del filtro percolador fueron de 1.3 m de altura de medio filtrante y 0.2 m de diámetro.

En la investigación realizada por Rivera A. et al (1998) donde aplicando un biofiltro con medio filtrante zeolita, su sistema alcanzó eficiencias de remoción de DQO de hasta 54.8% para una razón de recirculación de 1, 52% para una razón de recirculación de 2 y 50.22% para una razón de recirculación de 3, verificándose que aunque aumentaba la razón de recirculación no favoreció en la eficiencia de remoción de DQO.

Con el filtro percolador empleando anillos de polipropileno de ¾” en la presente investigación se logró con una recirculación de razón 1 (100%) mejorar la eficiencia del filtro percolador, alcanzando eficiencias de remoción de 66%, 86% y 85 % para SST, DBO y DQO respectivamente. La recirculación influyó en la mejora de la eficiencia del filtro percolador, logrando que tenga 10 % más de eficiencia de remoción de DQO respecto a la eficiencia obtenida con la no se recirculación.

Almeida, P. (2007), en su investigación empleando anillos de polipropileno como medio filtrante obtuvo los siguientes resultados: aplicando una carga orgánica de 0,24kgDBO/m³.d y una carga hidráulica de 10 m³/m².d, obtuvo concentraciones en promedio de 34 mg/l, 118 mg/l y 65 mg/l de DBO, DQO y SST respectivamente, teniendo una eficiencia global de 84% para DBO, 78 % para DQO y 72 % para SST.

Para una carga orgánica de 0,43kgDBO/m³.d y una carga hidráulica de 20 m³/m².d, obtuvo concentraciones en promedio de 40 mg/l, 88 mg/l y 77 mg/l de DBO, DQO y SST respectivamente, teniendo una eficiencia global de 82% para DBO, 77 % para DQO y 72 % para SST.

Se puede observar que a diferencia del filtro sumergido con el filtro percolador no se obtuvo mayores eficiencias a mayor carga orgánica, ya que a 0.796 Kg.DBO/m³/d se obtuvo eficiencias de 63%, 77 % y 77% para SST, DBO y DQO respectivamente, valores similares a los obtenidos por Almeida, P. (2007) empleando menores cargas orgánicas.

Pereira, A. (2005) en sus resultados menciona que independientemente de la configuración del medio plástico del filtro percolador que empleó en su investigación, las concentraciones promedio resultantes de DQO, DBO y SST, fueron de 96 mg/l, 40 mg/l y 32 mg/l respectivamente, variando con las concentraciones de 68 mg/l de SST y 58 mg/l de DBO obtenidos en la máxima eficiencia del filtro percolador de la presente investigación, coincidiendo únicamente con la concentración de 93 mg/l de DQO.

3.3 Conclusiones

- Se determinó las concentraciones de los parámetros temperatura, turbiedad, pH, SST, DBO y DQO a partir de la realización de siete muestreos en los cuatro meses que duró la etapa de experimentación, tomando muestras tanto del afluente como de los efluentes del filtro sumergido y filtro percolador.
- Se determinó que la mejor eficiencia de remoción del filtro sumergido (FS) fue a 80 días del inicio de funcionamiento aplicando una carga hidráulica de $4.125 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$ y carga orgánica de $0.831 \text{ Kg.DBO}/\text{m}^3/\text{d}$ con la inyección de aire artificial, obteniendo concentraciones de 16 mg/l DBO, 51 mg/l de DQO y 36 mg/l de SST, significando eficiencias de remoción de 94%, 88% y 82% respectivamente. Sin la inyección de aire artificial se alcanzó eficiencias de 79%, 74% y 71% para la remoción de DBO, DQO y SST respectivamente.
- Se determinó que la mejor eficiencias de remoción del filtro percolador (FP) fue a 60 días del inicio de funcionamiento aplicando una carga hidráulica de $4.125 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$ y carga orgánica de $0.796 \text{ Kg.DBO}/\text{m}^3/\text{d}$ con la inyección de aire artificial, obteniendo concentraciones de 58 mg/l DBO, 93 mg/l de DQO y 68 mg/l de SST, significando eficiencias de remoción de 77%, 77% y 63% respectivamente. Sin la inyección de aire artificial se alcanzó eficiencias de 74%, 72% y 64% para la remoción de DBO, DQO y SST respectivamente.
- Para el sistema de tratamiento en serie FS+FP con inyección de aire artificial, se obtuvo eficiencias de 83%, 95% y 89 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente. Sin la inyección de aire con el sistema en serie se obtuvo eficiencias de 72%, 85% y 82 % para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.
- Se determinó que con la inyección de aire artificial, el FS obtuvo mayores eficiencias en un 15% para SST, en 15% para DBO y en 8% para DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por el FP. Con el sistema en serie se obtuvo mayores eficiencias en un 5% para SST, 3% para DBO y 4% para DQO, respecto a las eficiencias obtenidas por FS. Respecto al FP, el sistema en serie obtuvo mayores eficiencias en un 20% para SST, 18% para DBO y 12 % para DQO.

3.4 Recomendaciones

- Tener en cuenta que las eficiencias de remoción de DBO y DQO varían de acuerdo a la tasa de aplicación orgánica e hidráulica en los filtros percoladores y filtros sumergidos.
- En la presente investigación se empleó como medio filtrante tanto para el filtro percolador y un filtro sumergido anillos de polipropileno corrugado de $\frac{3}{4}$ de pulgada, obtenidos de manguera corrugada cortados cada 2.5 cm. Se recomienda probar con otros materiales para determinar la eficiencia tanto del filtro sumergido como del filtro percolador.
- Se recomienda que para otras investigaciones se pueda determinar la influencia de la recirculación en la eficiencia del filtro sumergido, y también la eficiencia del filtro percolador a diferentes alturas del medio filtrante.
- Tener en cuenta que pueden aparecer moscas *Psychoda*, en filtros percoladores, para lo cual el diseño debe permitir la inundación temporal del filtro para la eliminación de larvas.
- En la presente investigación se empleó una misma carga hidráulica y carga orgánica de un mismo afluente (tanque séptico) durante toda la fase de experimentación, se recomienda probar con diferentes cargas hidráulicas y orgánicas para conocer ampliar los conocimientos de la eficiencia de remoción de un sistema en serie compuesto por un filtro percolador y un filtro sumergido.
- En zonas rurales se puede emplear medios de filtración de grava, piedra u otro material que se pueda encontrar en las comunidades, teniendo en cuenta que se busca la mayor cantidad de área superficial.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almeida, P. (2007). *Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores uasb, com ênfase na nitrificação*. Tesis para obtener el título de Maestro en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos. Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte Brasil.
- Bayona, J. & Quiroz, C. (2003). *Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional de Trujillo mediante el uso de un biofiltro*. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Cecen, F. and I. Gonen (1992): *Nitrificationdenitrification of high strength nitrogen wastes in two up-flow submerged filters*. Wat. Sci. and Tech. 26(9/11):2225-2228.
- Chui, P.C., Y. Terashima, J. Tay and H. Ozaki (2001): *Wastewater treatment and nitrogen removal using submerged filter systems*. Wat. Sci.Tech. 43(1):225-232.
- Departamento de sanidad del estado de Nueva York (1990). *Manual de tratamiento de aguas negras* (versión en lengua española). México D.F.: Editorial Limusa-Wiley.
- Gómez, D. (2000) *Ecuación de diseño para película fija sumergida, PFS. Sistema de biopelícula*. En: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas. México, D.F, FEMISCA, 2000. p.1-23 [t.II], Ilus, tab.
- Garibay, J. & Orellana, B. (2011). *Estudio de la Capacidad de los filtros biológicos aireados de un efluente RAFA para agua residuales provenientes de la industria del camal*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Sanitario, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Edición). México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Kamal, E., Sameh, E., Radwan, K. & Ayman, A. (2004). *Effect of distribution nozzles on trickling filter performance*. Zagazig, Egipto: Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Zagazig.
- Muñoz H., Lehmann H., & Martínez P. G. (1995). *Manual de depuración Uralita. Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes*. España: Editorial Paraninfo, S.A.
- Orozco, C., Pérez, A., González, M^a, Rodríguez, F., Alfayate, J (2002). *Contaminación ambiental. Una visión desde la Química*. España: Thomson.
- Pereira, A. (2005). *Avaliação de desempenho de um filtro biológico percolador em diferentes meios suporte plásticos*. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Civil. Facultad de Coordinación de Programas de Postgrado de Ingeniería, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil.
- Perú, Ministerio del Ambiente. (2010). *Decreto Supremo N° 003-2010/MINAM que aprueba Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR*. Lima.
- Perú, Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2013). *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Lima.
- Reyes, S. (2005). *Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la eficiencia de remoción de un empaque estructurado en un filtro percolador*. Tesis para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas de Puebla, México.
- Ramírez, A. (2010). *Implementación del material denominado: Ripio clasificado de concreto como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto "Ing. Arturo Pazos Sosa"*. Trabajo de graduación para optar en grado académico de

Maestro en Ingeniería Sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

- Rivera, A., Valdés, P., Castro, R., Nieves, G. & La Torre, V. (1998). *Influencia de la recirculación en un sistema de filtro percolador*. Habana, Cuba: Instituto de investigación para la Industria Alimenticia.
- Rolim, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales en sistemas de regadío*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Romero, Jairo. (2001). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Seoanez, Mariano. (1999). *Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Soto S., Bucio J. L., Miranda E., Avila J. C, Cuevas J. y Carrión M. (2008): *Evaluación de un sistema de filtros sumergidos en el tratamiento de aguas residuales de la comunidad de Mahahual en el estado de Quintana Roo, México*. Rev. Invest. Mar. 29(1):39-46, 2008
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D. (2003). *Wastewater Engineering (Treatment and Reuse) / Metcalf & Eddy, Inc. (4th Edition ed.)*. New York: McGraw-Hill Book Company.

ANEXOS

ANEXO I: PANEL DE OPERACIÓN Y TOMA DE MUESTRAS

- 1. Colocación de agua residual en depósito para transportar a laboratorio:**



- 2. Toma de muestra de agua residual a la entrada de sistema:**



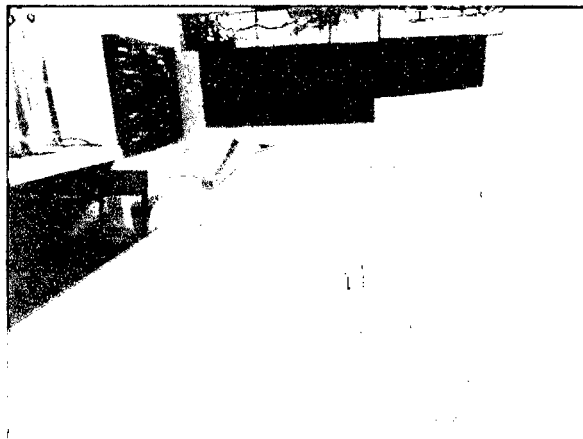
- 3. Toma de muestra a la salida de FP:**



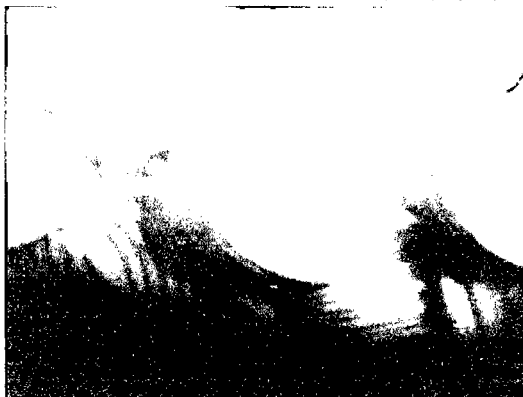
4. Colocación de sistema de aireación y material de rellano en FP:



5. Muestras de agua residual:



6. Crecimiento de bacterias en material de relleno de filtro sumergido:



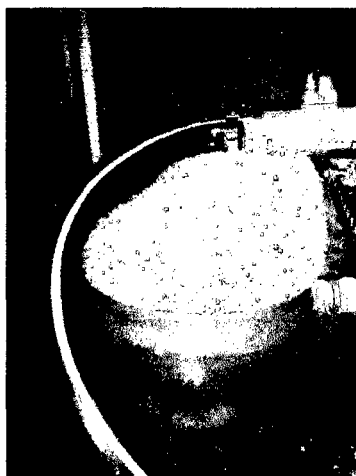
7. Aparición de mosca *Psychoda*:



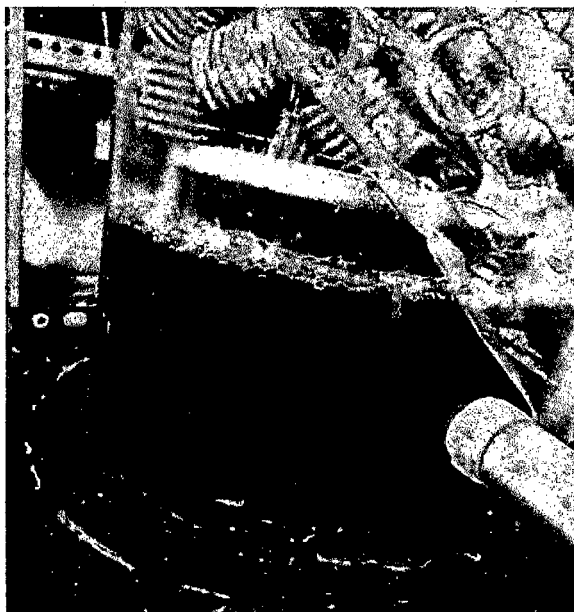
8. Larvas *Psychoda* en sistema de distribución de filtro percolador:



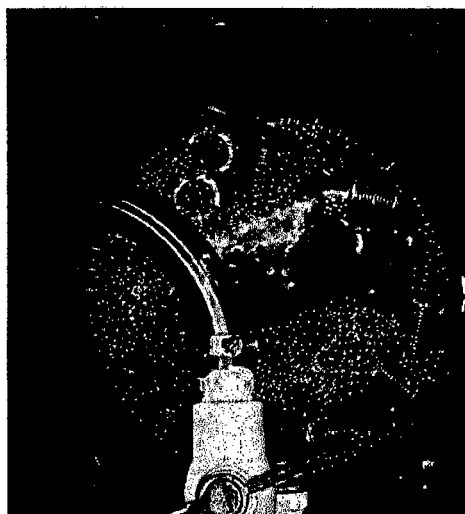
9. Espuma en filtro sumergido:



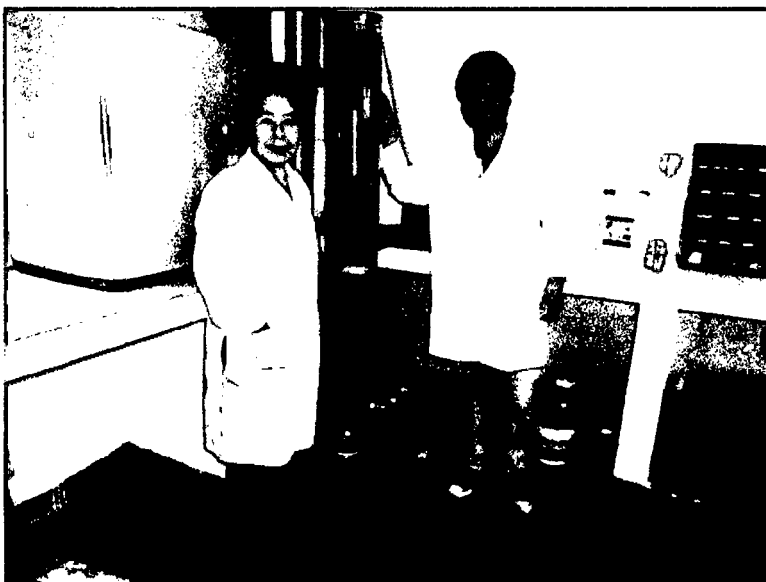
10. Lodos en filtro percolador:



11. Burbujas en filtro sumergido:



12. En el laboratorio con mi asesor de tesis, la Ing. M.Sc. Mirtha Felícita Valverde Vera:



13. La Ing. M.Sc. Mirtha Felícita Valverde Vera tomando una muestra del filtro sumergido para medir pH y temperatura in situ:



ANEXO II: PANEL DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS



Ilustración 1: Midiendo la turbiedad



Ilustración 2: Midiendo SST



Ilustración 3. Colocación de muestra para caracterización de DQO



Ilustración 4: Viales para DBO y DQO



Ilustración 5: Colocación de muestra en la incubadora

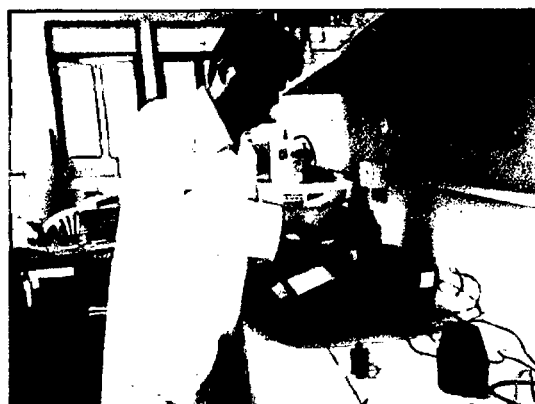


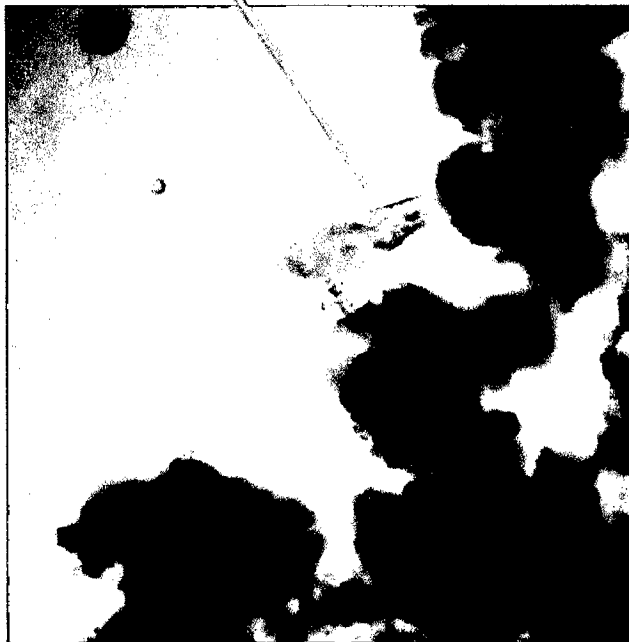
Ilustración 6: Medición de DBO después de 5 días con el espectrofotómetro

ANEXO III: PANEL DE OBSERVACIÓN DE ALGUNOS MICROORGANISMOS DEL FILTRO PERCOLADOR Y FILTRO SUMERGIDO

1. Observando una muestra de biofilm en el microscopio:



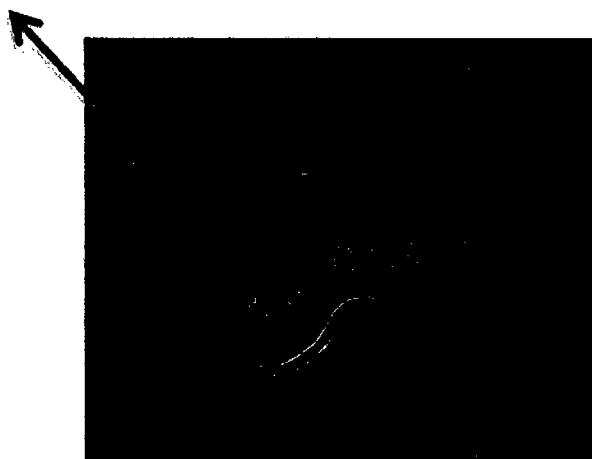
2. Protozoo *Paramecium* alimentándose en una colonia de bacterias en una muestra de biofilm del filtro sumergido:



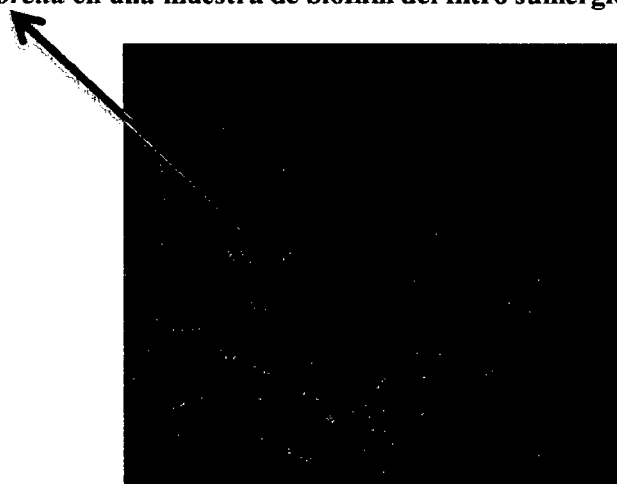
3. Rotífero *Brachionus* atrapado por materia orgánica en el porta objeto, en una muestra de biofilm del filtro percolador:



4. Nematodo en una muestra de filtro sumergido:



5. Alga *Chlorella* en una muestra de biofilm del filtro sumergido:



ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN BIOLÓGICA

Se empleó un caudal constante de 1.5 ml/s tanto para el filtro sumergido como para el filtro percolador.

Características del filtro sumergido

Característica	Descripción/valor	Unidad
Diámetro externo	0.2	m
Espesor de pared	3	mm
Altura total	1.53	m
Altura mojada	1.48	m
Altura de medio filtrante	1.3	m
Volumen útil	0.046	m3
Tiempo de retención	8.6	h
Dirección del flujo	Ascendente	
Carcasa de soporte	Tubo de acrílico transparente	
Material filtrante	Anillos de polipropileno de 3/4"	
Sistema de aireación	Piedras difusoras	

Características del filtro sumergido percolador

Característica	Descripción/valor	Unidad
Diámetro externo	0.2	m
Espesor de pared	3	mm
Altura total	1.53	m
Altura mojada (salida en basa)	0.1	m
Altura de medio filtrante	1.3	m
Volumen (retención agua)	0.003	m3
Tiempo de retención	0.6	h
Dirección del flujo	Descendente	
Carcasa de soporte	Tubo de acrílico transparente	
Material filtrante	Anillos de polipropileno de 3/4"	
Sistema de aireación	Piedras difusoras	

Características del material de relleno

Característica	Descripción/valor	Unidad
Material	Polipropileno	
Diámetro	1.905	cm
longitud	2.5	cm
Área superficie específica	220	m2/m3
Índice de vacíos	95	%

ANEXO V: COSTO DE ENERGÍA POR AIREACIÓN

Características de las bombas de aire

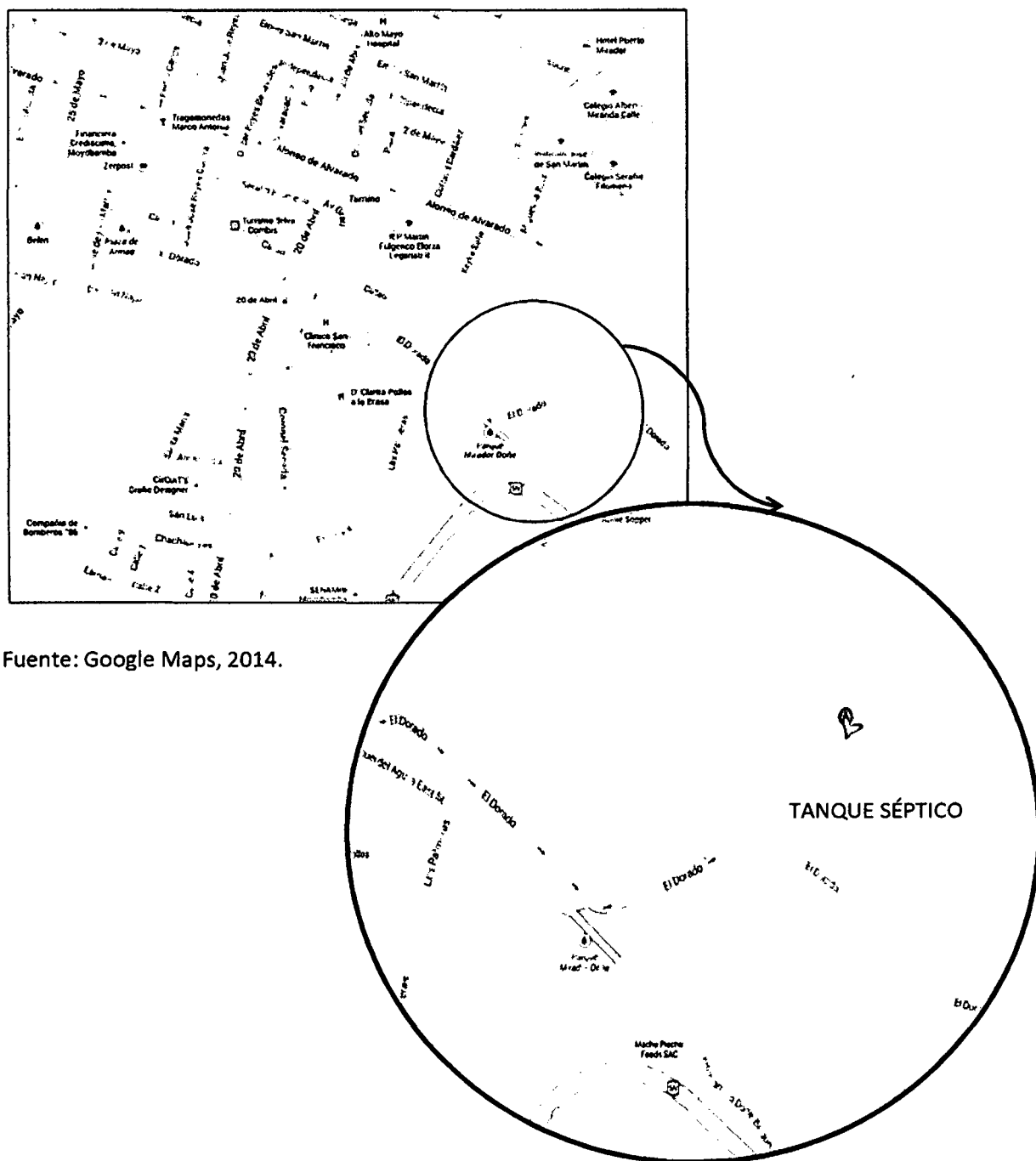
Cantidad	Descripción	Capacidad	Potencia	Modelo	Marca
1	Bomba de aire	2x4 L/min	5W	AP408A	Venusaqua
1	Bomba de aire	2x4 L/min	5W	AP608A	Venusaqua

Cálculo del costo unitario

Descripción	Valor	Unidades	Cálculo
Precio de energía	0.5981	Soles/kW-h	a
Duración aireación	24	horas/día	b
Agua tratada en un día	0.13	m3/día	c
Potencia de bombas	0.005	kW	d
Nº de bombas	2		e
Consumo energía diario	0.24	kW-h/día	f=b*d*e
Consumo de energía por m3	1.846	kW-h/m3	g=f/c
Costo unitario	1.104	soles/m3	h=g*a

El costo unitario de aireación por m3 de agua residual tratada fue de **1.104 Soles/m3**

ANEXO VI: UBICACIÓN DEL TANQUE SEPTICO (FUENTE DEL AGUA RESIDUAL A EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN)



ANEXO VII: REQUISITOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS

REQUISITOS PARA TOMA DE MUESTRA DE AGUA RESIDUAL Y PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL MONITOREO

Determinación/Parámetro	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (1)	Preservación y concentración	Tiempo máximo de duración
Fisicoquímico				
Temperatura	P,V	1000 mL	No es posible	15 min
pH (2)		50 mL	No es posible	15 min
DBO ₅ (3)	P,V	1000 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
DQO (3)	P,V	100 mL	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar a 4°C	28 días
Aceites y grasas	V, ámbar boca ancha calibrado	1000 mL	Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar a 4°C	28 días
Sólidos suspendidos Totales (SST)	P,V	100 mL	Refrigerar a 4°C	7 días
Microbiológico				
Coliformes termotolerantes (NMP)	V, esterilizado	250 mL	Refrigerar a 4°C Agregar tiosulfato en plantas con cloración	6 horas

Fuente: Resolución Ministerial N°273-2013-VIVIENDA

(1) No hay restricción para el volumen máximo de la muestra.

Leyenda:

P = frasco de plástico o equivalente; V = frasco de vidrio